Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

16+
ISSN 2071-6168

ИЗВЕСТИЯ ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 11

Тула
Издательство ТулГУ
2020

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ: **ISSN 2071-6168**

Председатель
Грязев М.В., д-р техн. наук, ректор.

Первый заместитель председателя
Воротилин М.С., д-р техн. наук, проректор по научной работе.

Заместитель председателя
Прейс В.В., д-р техн. наук, заведующий кафедрой, авторизованный представитель Издательства ТулГУ в РИНЦ.

Ответственный секретарь
Фомичева О.А., канд. техн. наук, начальник Управления научно-исследовательских работ, авторизованный представитель ТулГУ в РИНЦ.

Члены редакционного совета:

Батанина И.А., д-р полит. наук, –
гл. редактор серии «Гуманитарные науки»;
Берестнев М.А., канд. юрид. наук, –
гл. редактор серии «Экономические и юридические науки»;
Борискин О.И., д-р техн. наук, –
гл. редактор серии «Технические науки»;
Егоров В.Н., канд. пед. наук, –
гл. редактор серии «Физическая культура. Спорт»;
Заславская О.В., д-р пед. наук, –
гл. редактор серии «Педагогика»;
Качурин Н.М., д-р техн. наук, –
гл. редактор серии «Науки о Земле»;
Понаморева О.Н., д-р хим. наук, –
гл. редактор серии «Естественные науки».

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор
Борискин О.И., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Заместитель главного редактора
Ларин С.Н., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Ответственный секретарь
Яковлев Б.С., канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Авторизованный представитель ТулГУ в РИНЦ
Журин А.В., канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Члены редакционной коллегии:

Александров А.Ю., д-р техн. наук (Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева, г. Ковров);
Баласанян Б.С., д-р техн. наук (Государственный инженерный университет Армении, г. Ереван, Армения);
Дмитриев А.М., д-р техн. наук (Московский государственный технический университет «СТАНКИН», г. Москва);
Запомель Я., д-р техн. наук (Технический университет Остравы, г. Острава, Чехия);
Колтунович Т.Н., д-р техн. наук (Люблинский технологический университет, г. Люблин, Польша);
Кристаль М.Г., д-р техн. наук (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград);
Ларкин Е.В., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Мельников В.Е., д-р техн. наук (Национальный исследовательский университет «МАИ», г. Москва);
Мещеряков В.Н., д-р техн. наук (Липецкий государственный технический университет, г. Липецк);
Мозжечков В.А., д-р техн. наук (АО «Тулаэлектропривод», г. Тула);
Распопов В.Я., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Савин Л.А., д-р техн. наук (Орловский государственный технический университет, г. Орел);
Степанов В.М., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Сычугов А.А., канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Трегубов В.И., д-р техн. наук (АО «НПО «СПЛАВ», г. Тула);
Яцун С.Ф., д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск).

Сборник зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). ПИ № ФС77-75986 от 19 июня 2019 г.

Подписной индекс сборника 27851 по Объединённому каталогу «Пресса России».

Сборник включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук», утвержденный ВАК Минобрнауки РФ, по следующим научным специальностям:

05.02.02 Машиноведение системы приводов и детали машин;
05.02.07 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки;
05.02.08 Технология машиностроения;
05.02.09 Технологии и машины обработки давлением;
05.02.13 Машины, агрегаты и процессы (по отраслям);
05.02.23 Стандартизация и управление качеством продукции;
05.09.03 Электротехнические комплексы и системы;
05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям);
05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям);
05.13.11 Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей.

© Авторы научных статей, 2020
© Издательство ТулГУ, 2020

МАШИНОВЕДЕНИЕ, СИСТЕМЫ ПРИВОДОВ И ДЕТАЛИ МАШИН

УДК 621.453; 457.001.57

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБЛАСТИ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ

А.А. Евланов, Е.В. Степанова

В представленной работе рассмотрены тепломассообменные процессы, протекающие на специализированной модельной установке. Приведено распределение средних в серии опытов значений температуры наружной поверхности стенки газовода по длине газовода, а также значений коэффициента теплоотдачи от продуктов сгорания к внутренней поверхности стенки газовода. Проанализированы особенности тепломассобменных процессов в области отрывных течений на основе проведенных экспериментальных работ, что позволяет обосновать проектные параметры узлов натурной конструкции, направленные на обеспечение тепловой защиты в области рециркуляционных зон.

Ключевые слова: модельная установка, газовод, диафрагма.

Движение рабочего тела в ряде узлов энергетических установок может быть схематически представлено как течение через диафрагму с одним или несколькими отверстиями. Известно, что данный вид течения характеризуется наличием в структуре течения рециркуляционной зоны или системы рециркуляционных зон за диафрагмой, причем теплообмен в области рециркуляционных зон резко интенсифицируется по сравнению со стабилизированным течением [1]. Основной объем исследований теплообмена в области рециркуляционных зон выполнен для условий внешнего обтекания воздухом уступов, впадин и т.д., в тоже время особенности теплообмена в условиях внезапного течения в каналах при высоких давлениях рабочего тела изучены недостаточно.

В данной работе проведен анализ распределения коэффициентов конвективной теплоотдачи в области рециркуляционных зон за диафрагмой в условиях достаточно высоких давлений (до 10 МПа).

Анализ поводился на основе результатов экспериментальных работ на специализированной модельной установке (рис. 1).

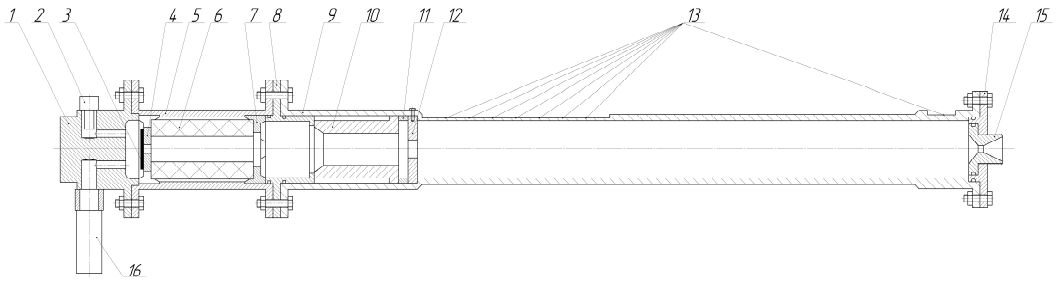


Рис. 1. Конструктивная схема специализированной модельной установки

Разработанная установка содержит дно переднее 1, электровоспламенитель 2, воспламенитель 3, диафрагму переднюю 4, корпус 5, заряд твердого топлива 6, диафрагму заднюю 7, переходник 8, обечайку 9, имитатор заряда 10, кольцо 11, диафрагму 12, термодатчики 13, крышку 14, сопло 15, датчик давления 16.

Разработанная установка работает следующим образом. После подачи электрического импульса на электровоспламенитель происходит его срабатывание и зажжение воспламенителя, при горении которого воспламеняется заряд твердого топлива. Продукты сгорания заряда протекают через имитатор заряда в преддиафрагменную область, проходят через диафрагму и истекают через сопло. При движении продуктов сгорания в задиафрагменной области образуется рециркуляционная зона. Конец рециркуляционной зоны (сечение присоединения) характеризуется значительным повышением коэффициента конвективной теплоотдачи, что приводит к локальному повышению температуры стенки обечайки, регистрируемому одним из термодатчиков.

Термодатчики размещались на наружной поверхности обечайки в одной области, проходящей через середину местных утонений обечайки в области диафрагмы и сопла. Утонения выполнялись в виде площадки на участке размещения термодатчиков, наличие местных утонений позволило поднять уровень температур стенки обечайки в области установки термодатчиков, что резко снизило влияние систематических и случайных погрешностей на результаты замеров. Толщина стенки обечайки в области утонения составляла 0,002 м.

В опытах использовалась диафрагма с осевым отверстием диаметром 0,02 м.

Распределение средних в серии опытов температур наружной поверхности стенки газовода по длине газовода для варианта с плоской диафрагмой с осевым отверстием диаметром 0,02 м приведено на рис. 2.

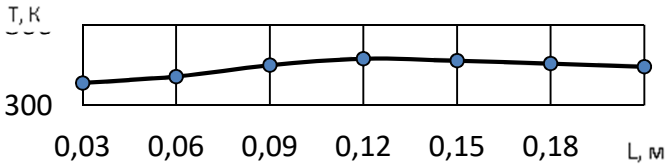


Рис. 2. Распределение средних в серии опытов максимальных температур наружной поверхности стенки обечайки

Результаты экспериментов показывают, что распределение температуры на участке газовода за диафрагмой имеет выраженный локальный максимум: средние в серии опытов значения температур наружной поверхности газовода в сечении, отстоящим от диафрагмы на 0,12 м составляет 590 К, а соответствующие значения температур поверхности газовода у сопла – 400 К. Этот эффект объясняется локальным увеличением коэффициента теплоотдачи в сечении, отстоящим от диафрагмы на 0,12 м.

Оценки средних за время работы модельной установки значений суммарного коэффициента теплоотдачи в различных сечениях (за счет конвективного теплообмена и теплообмена излучением) проводились методом решения обратной задачи теплопроводности. При этом использовались средние значения теплофизических характеристик материала газовода (сталь 10) в интервале изменения начальных и конечных температур стенки газовода при испытаниях.

На рис. 3 приведено распределение средних в серии опытов значений коэффициентов теплоотдачи от продуктов сгорания к внутренней поверхности стенки газовода подлине газовода для варианта установки с плоской диафрагмой с осевым отверстием диаметром 0,02 м.

В соответствии с экспериментами отношение максимальных значений суммарных коэффициентов теплоотдачи в области рециркуляционных зон к максимальным значениям коэффициентов теплоотдачи у сопла установки составляет для варианта установки с плоской диафрагмой с осевым отверстием диаметром 0,02 м – 3,4.

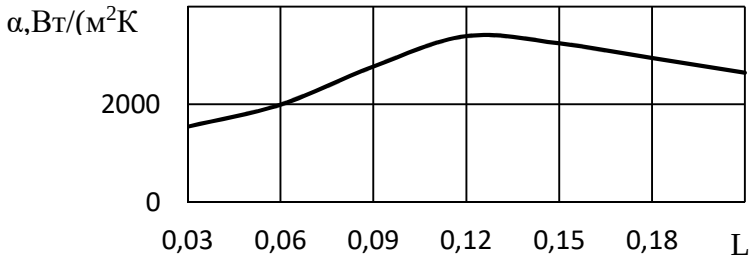


Рис. 3. Распределение средних в серии опытов значений коэффициентов теплоотдачи от продуктов сгорания к внутренней поверхности стенки газовода по длине газовода для варианта установки с плоской диафрагмой с осевым отверстием диаметром 0,02 м

Для определения значений коэффициентов конвективной теплоотдачи в области рециркуляционных зон проводилась оценка коэффициентов теплоотдачи излучением по известным зависимостям для различных моментов времени с учетом изменения температур внутренней поверхности стенки при работе установки. В расчетах коэффициентов конвективной теплоотдачи использовались средние значения коэффициентов теплоотдачи излучением по времени для каждого поперечного сечения газовода модельной установки.

На рис. 4 приведено распределение средних в серии опытов значений коэффициентов конвективной теплоотдачи от продуктов сгорания к внутренней поверхности стенки газовода по длине газовода для варианта установки с плоской диафрагмой с осевым отверстием диаметром 0,02 м.

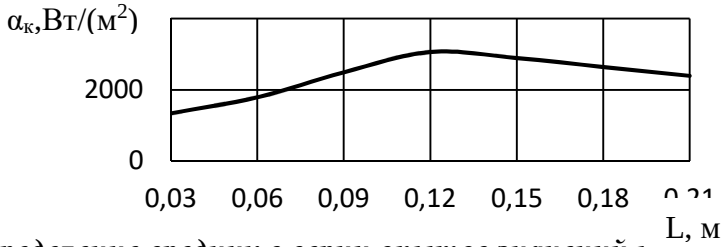


Рис. 4. Распределение средних в серии опытов значений коэффициентов конвективной теплоотдачи от продуктов сгорания к внутренней поверхности стенки газовода по длине газовода для варианта установки с плоской диафрагмой с осевым отверстием диаметром 0,02 м

Обработка экспериментальных результатов показала, что в серии опытов с плоской диафрагмой с осевым отверстием диаметром 0,02 м среднее значение коэффициента конвективной теплоотдачи у сопла составляет 690 Вт/(м^{2}К).

Результаты расчетов показывают, что отношение максимальных значений коэффициентов конвективной теплоотдачи в области рециркуляционных зон к максимальным значениям коэффициентов конвективной теплоотдачи у сопла установки составляет для варианта установки с плоской диафрагмой с осевым отверстием диаметром 0,02 м – 4,4.

Полученные результаты имеют важное практическое значение, поскольку они позволяют обосновать конструктивные мероприятия, направленные на обеспечение тепловой защиты конструкций в области рециркуляционных зон.

Список литературы

1. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / В.С. Авдуевский [и др.]. М.: Машиностроение, 1975. 624 с.

Евланов Андрей Александрович, аспирант, инж. 1 категории, ewlanow71@mail.ru, Россия, Тула, «АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева»,

Степанова Евгения Викторовна, аспирант, ведущий инженер, evg_nikolaeva@mail.ru, Россия, Тула, «АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева»

FEATURES OF HEAT AND MASS EXCHANGE PROCESSES IN THE AREA OF DETACHED FLOWS

A.A. Evlanov, E.V. Stepanova

In this paper, heat and mass transfer processes occurring in a specialized model installation are considered. Given the distributions in a series of experiments the temperature of the outer surface of the wall of the gas passage along the length of the gas passage, and also values of the heat transfer coefficient from combustion products to the inner wall surface of the gas passage. The features of heat and mass exchange processes in the field of detached flows are analyzed on the basis of experimental work, which allows us to justify the design parameters of full-scale design units aimed at providing thermal protection in the area of recirculating zones.

Key words: model installation, gas pipeline, diaphragm.

Evlanov Andrey Aleksandrovich, graduate student, ing. 1 categories, ewlanow71@mail.ru, Russia, Tula, «JSC «NPO» SPLAV» named after A.N. Ganichev»,

Stepanova Evgenia Viktorovna, graduate student, leading engineer, evg_nikolaeva@mail.ru, Russia, Tula, «JSC «NPO» SPLAV» named after A.N. Ganichev»

УДК 621.453; 457.001.57

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РАБОЧЕГО ТЕЛА НА ПАРАМЕТРЫ РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ЗОН

А.А. Евланов, Е.В. Степанова

В представленной работе рассмотрены тепломассообменные процессы, протекающие на специализированной модельной установке. Приведено распределение параметров средних в серии опытов значений температуры пристеночной области газовода по длине газовода. Проанализированы особенности тепломассобменных процессов в области отрывных течений на основе проведенных экспериментальных работ, что позволяет обосновать проектные параметры узлов натурной конструкции, в области рециркуляционных зон.

Ключевые слова: модельная установка, газовод, диафрагма.

В ряде конструкций, использующих в качестве рабочего тела высокотемпературные газовые потоки, имеются узлы, течения в которых схематически может быть представлено как течение за внезапным расширением канала (рис. 1).

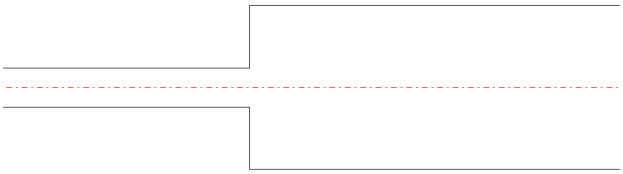


Рис. 1. Расчетная схема

Известно, что данный вид течения характеризуется наличием тороидальных рециркуляционных зон [1] за участком входа потока. Особенность тепломассобменных процессов в области рециркуляционных зон является резкая интенсификация теплообмена в области присоединения: в 3 – 4 раза выше по сравнению со стабилизированным течением. Это вызывает необходимость определения размеров зон при проектировании конструкций.

В процессе проведения работ по полунатурному моделированию процессов за внезапным расширением, при определении размеров рециркуляционных зон в которых в качестве рабочего тела используется газ с температурными характеристиками, отличающимися от характеристик реального рабочего тела возникает, вопрос о переносимости полученных результатов на натурные процессы.

В связи с этим необходимо проведение оценки влияния параметров рабочего тела в модельной установке на размеры рециркуляционных зон при течении в камере с внезапным расширением.

В работе показано, что размеры рециркуляционных зон практически не зависят от давления рабочего тела. Целью данной работы является определение зависимости длины рециркуляционных зон от температуры рабочего тела, что актуально, поскольку полунатурное моделирование в большинстве случаев осуществляется при использовании рабочего тела с температурой меньше температуры рабочего тела в натурной конструкции.

Для решения задачи использовалась следующая система уравнений [2].

Система уравнений для газовой фазы содержала уравнения сохранения и уравнение состояния.

Для газовой фазы:

- уравнение неразрывности:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho div\vec{V} = 0,\ \forall x_m \in W_O,\ t > 0;$$

- уравнение количества движения:

$$\rho\frac{d\vec{V}}{dt} = \rho\vec{F} - gradP + Div\,\boldsymbol{\sigma} - \vec{F}_f,\ \forall x_m \in W_O,\ t > 0;$$

- уравнение энергии:

$$\rho\frac{dE}{dt} = \rho\vec{F}\cdot\vec{V} - div(P\vec{V}) + Div(\boldsymbol{\sigma}\vec{V}) + div\,\vec{q}_T - e_f;\ \forall x_m \in W_O,\ t > 0,$$

- уравнение состояния:

$$P = \rho TR,$$

где W_O – объем области; t – время, $E=U+V^2/2$ – удельная полная энергия смеси, $U=c_VT$ – удельная внутренняя энергия, $\vec{V}$, P и T – вектор скорости потока в данной точке, давление и температура; x_m – пространственные координаты; ρ – плотность газа; $\vec{q}_T$ – вектор плотности теплового потока; $\vec{F}$ – вектор плотности внешних массовых сил; $\vec{F}_f$ – вектор сил межфазового взаимодействия:

$$\vec{F}_f = \frac{1}{8}C_\delta\rho\pi\delta^2|\vec{V} - \vec{V}_K|\cdot(\vec{V} - \vec{V}_K),$$

где $C_\delta = C_x \cdot C_{cf}$ – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы сложной формы, C_{cf} – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы идеальной сферической формы.

$$C_{cf} = \begin{cases} \dfrac{24}{\mathrm{Re}} + \dfrac{4}{\mathrm{Re}^{0.33}}, & 0 < \mathrm{Re} < 700 \\ \dfrac{4.3}{\sqrt{\lg(\mathrm{Re})}}, & 700 < \mathrm{Re} < 2000 \end{cases};$$

где C_x – коэффициент, учитывающий отклонение формы частицы от идеальной сферической.

Для решения задачи использовался программный комплекс Gas-3. Диапазон изменения температур рабочего тела составлял от 1000 К до 1637 К.

На рис. 2 и 3 представлены распределение линий тока для вариантов с температурами 1000К и 1637 К, а на рис. 4 и 5 соответственно, эпюра скорости пристеночного потока в области за внезапным расширением.

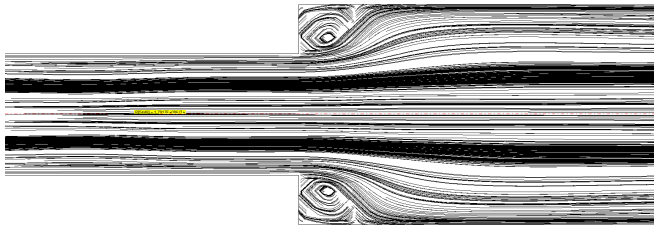


Рис. 2. Распределение линий тока для варианта с T = 1000 K

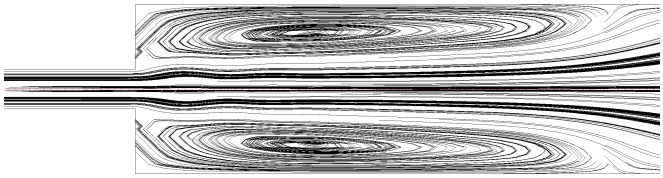


Рис. 3. Распределение линий тока для варианта с T = 1637 K

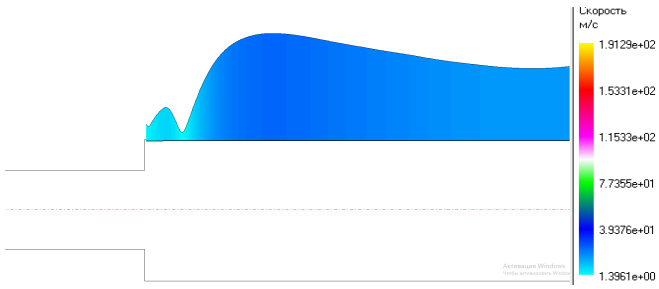


Рис. 4. Эпюра скорости пристеночного потока для варианта с T = 1000 K

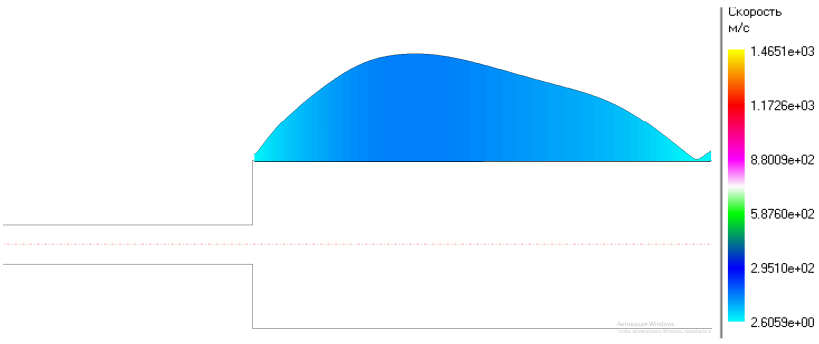


Рис. 5. Эпюра скорости пристеночного потока для варианта с T = 1637 K

Как показывают результаты расчета, длина рециркуляционной зоны практически не зависит от температуры рабочего тела, что является обоснованием для проведения работ по полунатурному моделированию тепломассообменных процессов на модельной установке с использованием рабочего тела с температурой в 1,637 раза ниже температуры рабочего тела в натурной конструкции.

Список литературы

1. Авдуевский В.С. [и др.] Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике/М.: Машиностроение, 1975. 624 с.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.

Евланов Андрей Александрович, аспирант, инж. 1 категории, ewlanow71@mail.ru, Россия, Тула, «АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева»,

Степанова Евгения Викторовна, аспирант, ведущий инженер, evg_nikolaeva@mail.ru, Россия, Тула, «АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева»

ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF GAS FLOW PARAMETERS ON THE SIZE OF RECIRCULATION ZONES

A.A. Evlanov, E.V. Stepanova

In this paper, heat and mass transfer processes occurring in a specialized model installation are considered. The distribution of the parameters of the average values of the temperature of the wall area of the gas pipeline over the length of the gas pipeline in a series of experiments is given. The features of heat and mass transfer processes in the area of separated flows are analyzed on the basis of experimental work, which allows us to justify the design parameters of full-scale construction units in the area of recirculation zones.
Key words: model installation, gas, diaphragm.

Evlanov Andrey Aleksandrovich, postgraduate, ing. 1 categories, ewlanow71@mail.ru, Russia, Tula, «JSC «NPO» SPLAV» named after A.N. Ganichev»,

Stepanova Evgenia Viktorovna, postgraduate, leading engineer, evg_nikolaeva@mail.ru, Russia, Tula, «JSC «NPO» SPLAV» named after A.N. Ganichev»

УДК 621.453; 457.001.57

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ГАЗОГЕНЕРАТОРАХ С МЕСТНЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ

А.А. Евланов, В.А. Дунаев, В.Ю. Сладков

В представленной работе рассмотрены программные комплексы, решающие вопросы предварительной оценки параметров рабочего процесса. Приведен программный комплекс проблемно-ориентированный на решение задач, связанных с математическим моделированием в газогенераторах сложных схем. Представлена сходимость результатов вычислительного эксперимента и результатов испытаний.
Ключевые слова: модельная установка, газовод, диафрагма.

Конструктивные особенности газогенератора с местными сопротивлениями, например, в виде решетки, диафрагмы, обуславливают сложную структуру течения в камере сгорания.

Для предварительной оценки параметров рабочего процесса в данных устройствах могут быть приняты известные программные комплексы (ANSYS, Cosmos и др.) Тем не менее, для детальности уточненного анализа рассмотренных процессов

необходима разработка специализированных программных комплексов, учитывающих специфические особенности функционирования газогенераторов. Это вызвано тем, что существующие комплексы не обладают полным набором необходимых возможностей, позволяющих учесть все особенности рассматриваемых процессов, например, описание процесса прихода рабочего тела.

Газодинамические процессы в подобных устройствах должны рассматриваться на основе комплексной математической модели, включающей взаимосвязанные модели нестационарного пространственного турбулентного течения двухфазных продуктов сгорания, модель механического и теплового взаимодействия частиц с газовой фащой, а также модель прихода газа.

В предположения отсутствия дробления и коагуляции частиц исходная система уравнений имеет следующий вид [1]:

Для газовой фазы:

- уравнение неразрывности:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho div\vec{V} = 0,\ \forall x_m \in W_O,\ t > 0;$$

- уравнение количества движения:

$$\rho\frac{d\vec{V}}{dt} = \rho\vec{F} - gradP + Div\,\boldsymbol{\sigma} - \vec{F}_f,\ \forall x_m \in W_O,\ t > 0;$$

- уравнение энергии:

$$\rho\frac{dE}{dt} = \rho\vec{F}\cdot\vec{V} - div(P\vec{V}) + Div(\boldsymbol{\sigma}\vec{V}) + div\,\vec{q}_T - e_f;\ \forall x_m \in W_O,\ t > 0,$$

- уравнение состояния:

$$P = \rho TR,$$

где W_O – объем области; t – время, $E=U+V^2/2$ – удельная полная энергия смеси, $U=c_VT$ – удельная внутренняя энергия, $\vec{V}$, P и T – вектор скорости потока в данной точке, давление и температура; x_m – пространственные координаты; ρ – приведенная плотность газа; $\vec{q}_T$ – вектор плотности теплового потока; σ – тензор напряжений вязкости; $\vec{F}$ – вектор плотности внешних массовых сил; $\vec{F}_f$ – вектор сил межфазового взаимодействия; e_f – интенсивность обмена удельной полной энергией межфазового взаимодействия (включающая теплообмен, работу межфазовых сил), c_V – удельная теплоемкость смеси при постоянном объеме; R – газовая постоянная продуктов сгорания.

Для конденсированной фазы уравнения имеют вид:

- уравнение неразрывности:

$$\frac{d\rho_k}{dt} + \rho div(\vec{V}) = 0, \frac{d\rho_k}{dt} + \rho_k div(\rho_k\vec{V}_k) = 0,\quad \forall x_m \in W_O,\ t > 0;$$

- уравнение количества движения:

$$\rho_k\frac{d\vec{V}_k}{dt} = \rho_k\vec{F}_k + \vec{F}_f,\quad \forall x_m \in W_O, t > 0;$$

- уравнение энергии:

$$\frac{dE_k}{dt} = \rho_k\overrightarrow{F_k}\cdot\vec{V}_k + e_f,\ \forall x_m \in W_O, t > 0,$$

где доли объема, занимаемые газовой и к-фазой, характеризуются величинами их объемного содержания (α_g и α_k), $\rho=\alpha_g\rho_{g0}$ и $\rho_k=\alpha_k\rho_{k0}$ – приведенные плотности фаз, ρ_{g0} и ρ_{k0} – истинные плотности фаз, при этом для рассматриваемых процессов $\alpha_g >> \alpha_k$. В математической модели принято обозначение $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{V}\cdot\nabla)$.

Вектор приведенных сил межфазового взаимодействия определяется формулой:

$$\vec{F}_f = \frac{1}{8} C_\delta \rho \pi \delta^2 |\vec{V} - \vec{V}_K| \cdot (\vec{V} - \vec{V}_K),$$

где $C_\delta = C_x \cdot C_{cf}$ – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы сложной формы, C_{cf} – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы идеальной сферической формы.

$$C_{cf} = \begin{Bmatrix} \frac{24}{\mathrm{Re}} + \frac{4}{\mathrm{Re}^{0.33}}, & 0 < \mathrm{Re} < 700 \\ \frac{4.3}{\sqrt{\lg(\mathrm{Re})}}, & 700 < \mathrm{Re} < 2000 \end{Bmatrix};$$

где C_x – коэффициент, учитывающий отклонение формы частицы от идеальной сферической [1].

Для построения математического описания турбулентного движения использована стандартная двухпараметрическая модель.

В качестве начальных условий задавались значения параметров потока во всех внутренних точках области течения в начальный момент времени:

$$V(x,y,z,0) = 0; \; P(x,y,z,0) = P_0; \; T(x,y,z,0) = T_0.$$

Границы расчетной области подразделялись на четыре типа: непроницаемая стенка, поверхность с приходом массы, срез сопла и ось симметрии.

Для непроницаемых границ задаются условия проскальзывания для касательной составляющей вектора скорости потока, при этом нормальная составляющая скорости равняется нулю.

На поверхности прихода массы происходит приток массы по нормали и поверхности со скоростью, определяемой по соотношению:

$$V_n = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{u_T \rho_T}{\rho}; \quad V_e = 0; \quad \varepsilon = E_T;$$

где $\dot{m}$ - секундно-массовый приход газа, ρ - плотность газа, E_T - энтальпия топлива.

На срезе сопла установленные граничные условия сводятся к заданию граничных параметров, равных параметрам потока газа перед границей.

На оси симметрии граничные условия имеют вид:

$$V_n = 0, \quad \frac{\partial X}{\partial n} = 0,$$

где n - внутренняя нормаль к оси, $X=(V,P,T)$.

Для параметров турбулентности граничные условия имеют следующий вид. Начальные условия во всей области потока: $e=e_0$, $\varepsilon=\varepsilon_0$,

Дополнительные условия на границах течения:

– на поверхности горения:

$$e = e_T; \quad \varepsilon = \varepsilon_T;$$

– на границе вытекания:

$$e = e_G; \quad \varepsilon = \varepsilon_G;$$

– на оси симметрии:

$$\frac{\partial e}{\partial n} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0;$$

– на непроницаемой стенке:

$$\frac{\partial e}{\partial n} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0.$$

Для численного решения приведенной системы уравнений применяется модифицированный метод крупных частиц, использующий схемы решения методом крупных частиц, но реализованный на сетке метода конечных элементов. Для построения численной модели используются гибридные элементы, состоящие из нескольких тетраэдров.

Блок-схема алгоритма, реализующего разработанную геометрическую модель, приведено на рис. 1 [2].



Рис. 1. Блок-схема алгоритма численного моделирования внутрикамерного газодинамического процесса в РДТТ

Разработанный программный комплекс проблемно-ориентирован на решение задач, связанных с математическим моделированием в газогенераторах сложных схем. Он включает следующие модули:

– прикладные модули программно-математического обеспечения параллельных вычислений для расчетов газодинамики в газогенераторах, реализующие усложненные модели механики сплошной среды, учитывающие явления прихода массы, гетерогенность и другие усложняющие факторы;

– прикладные модули программного обеспечения для расчетов трехмерных турбулентных течений гетерогенных газовых;

– препроцессор, предназначенный для подготовки исходных данных в удобной для пользователя форме, выполняющий импорт геометрии исследуемого объекта в форматах, используемых стандартными отраслевыми CAD-системами при проектировании; формирование конечно-элементной сетки дискретизации исследуемой области; задание свойств моделируемых сред; формирование граничных и начальных условий;

– постпроцессор, предназначенный для представления результатов моделирования в удобной для пользователя форме, выполняющий визуальное представление получаемых результатов вычислительных экспериментов в виде цветных контурных и векторных изображений, эпюр, представление результатов в виде изолиний, построение сечений, графический запрос результатов; построение графиков зависимостей переменных от времени; анимация истории процессов, движения потоков.

При тестировании программного комплекса сравнивались результаты вычислительных экспериментов и известных экспериментальных и технических результатов ряда задач, которые показали хорошее совпадение результатов.

В качестве примера, сходимость результатов вычислительного эксперимента и результатов испытаний генератора на рис. 2 приведены экспериментальные зависимости давления от времени и расчетные значения давления для начала работы.

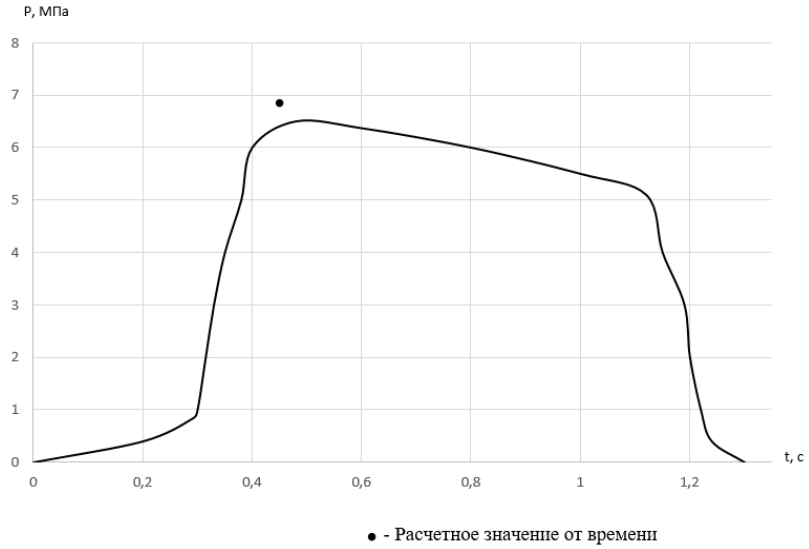


Рис. 2. Зависимость давления от времени вычислительного эксперимента и результатов испытаний

Сравнение результатов позволяет сделать вывод о хорошей сходимости теоретических и экспериментальных результатов и адекватности разработанной модели и программного комплекса.

Список литературы

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.

2. Дунаев В.А. [и др.] Разработка реактивных снарядов РСЗО на базе компьютерных технологий/ Тула, Известия ТулГУ, 2010. 216 с.

Евланов Андрей Александрович, аспирант, инж. 1 категории, ewlanow71@mail.ru, Россия, Тула, «АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева»,

Дунаев Валерий Александрович, д-р техн. наук, профессор, dwa222@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Сладков Валерий Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, dwa222@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

SOFTWARE PACKAGE FOR DISTRIBUTION OF WORKING PROCESS PARAMETERS IN GAS GENERATORS WITH LOCAL RESISTANCES

A.A. Evlanov, V.A. Dunaev, V.Yu. Sladkov

In this paper, we consider software packages that solve the issues of preliminary assessment of workflow parameters. The paper presents a software package that is problem-oriented for solving problems related to mathematical modeling in gas generators of complex circuits. The convergence of computational experiment results and test results is presented.

Key words: model installation, gas pipeline, diaphragm.

Evlanov Andrey Aleksandrovich, postgraduate, ing. 1 categories, ewlanow71@mail.ru, Russia, Tula, «JSC «NPO» SPLAV» named after A.N. Ganichev»,

Dunaev Valery Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor, dwa222@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Sladkov Valery Yurievich, doctor of technical sciences, professor, dwa222@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 531.58

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НЕЛЕТАЛЬНОГО ВЫСТРЕЛА ИЗ БОЕВОГО ОРУЖИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВКЛАДНОГО СТВОЛА

Е.Н. Патрикова, Т.С. Патрикова, А.А. Лосева

Представлены результаты математического моделирования процесса функционирования табельного оружия в дополнительном режиме нелетального действия с использованием специальных устройств, обеспечивающих надежность работы автоматики оружия и выполнение требований по травмобезопасности.

Ключевые слова: специальное устройство, нелетальное действие, травмобезопасность, легкодеформируемая пуля, табельное оружие.

Современная концепция применения огнестрельного оружия сотрудниками силовых структур состоит в нейтрализации (избегая термина уничтожение) атакующего или группы атакующих, в соответствии с текущим законодательством. Закон предусматривает нанесение наименьшего вреда, но никак не смерти нападающего. Данные положения требуют достаточно высокого уровня психологической подготовки и владения навыками производства выстрела.

В настоящее время основной тенденцией в организации стрелковой подготовки личного состава правоохранительных органов является стремление максимально приблизить условия проведения учебно-тренировочных боев к условиям реального огневого контакта. Непременным требованием при этом является возможность ведения стрельбы «на поражение».

Технология моделирования ситуационных задач со стрельбой «на поражение» в процессе огневой подготовки сотрудников силовых структур повышает эффективность и надежность применения оружия в их работе. А использование личного оружия, для учебно-тренировочной стрельбы «на поражение» легкодеформируемыми пулями делает эту технологию обучения наиболее перспективной.

Общий недостаток применяемых в настоящее время учебно-тренировочных средств заключается в том, что используемое оружие не является тем самым оружием, с которым сотрудники силовых структур проводят боевые операции и искусству владения которым их необходимо обучать.

Перспективным способом повышения эффективности огневой подготовки сотрудников силовых структур, является использование личного оружия, оснащенного специальными устройствами и боеприпасами, для учебно-тренировочной стрельбы, а также для оказания психологического и физиологического воздействия на правонарушителей.

Такие специальные устройства и боеприпасы позволяют [2], в зависимости от ситуации, использовать оружие, находящееся на вооружении силовых структур в двух режимах: специального оружия травматического действия, стреляющего легкодеформируемыми пулями, обеспечивающими, с одной стороны, останавливающее действие на правонарушителей а, с другой стороны, проведение учебно-тренировочных боев со стрельбой «на поражение»; боевого оружия. Причем переход с одного режима стрельбы на другой мобилен, а сами специальные устройства просты по конструкции, технологичны и дёшевы в производстве.



Внешний вид вкладного ствола и специальных боеприпасов для табельного оружия

Сложность математического описания процесса выстрела легкодеформируемой пулей при использовании вкладного ствола с диаметром, меньшим калибра пули, является следствием необходимости совместного решения основной задачи внутренней баллистики и задачи по определению параметров напряженно-деформированного состояния материала легкодеформируемой пули. Для решения первой задачи необходимо знать силу сопротивления перемещению пули по каналу вкладного ствола, определяемую из решения второй задачи, а для решения второй задачи необходимо знать перемещение и скорость движения пули, которые являются результатом решения первой задачи.

В основу расчета внутренней баллистики табельного оружия при стрельбе легкодеформируемыми пулями с использованием вкладного ствола была положена термодинамическая модель рабочего процесса, изложенная в [2] .

Однако, ввиду необходимости совместного решения двух задач, поставленных выше, модель пришлось видоизменить и создать новую модель взаимосвязанных процессов, протекающих в канале ствола табельного оружия при стрельбе легкодеформируемыми пулями.

Во-первых, возможность определения силы сопротивления перемещению легкодеформируемой пули по каналу ствола, являющейся результатом решения второй задачи, позволила исключить коэффициент фиктивности, учитывающий действие второстепенных сил, поэтому уравнение движения пули в пиродинамическом периоде несколько изменилось; помимо силы, движущей пулю, в уравнение введена сила, тормозящая пулю.

Во-вторых, исследование систем со свободным затвором привело к необходимости введения в модель уравнения движения затвора.

В-третьих, для исследуемого процесса характерно малое давление, при котором происходит выталкивание пули из дульца гильзы, вследствие чего введен учет постепенности воспламенения порохового заряда по объему гильзы и в качестве начального давления берется давление, создаваемое капсулем-воспламенителем в свободном объеме гильзы.

В-четвертых, специфика исследуемого процесса потребовала учета в уравнении сохранения энергии работ по перемещению затвора и газопороховой смеси.

Следствием этого явились соответствующие изменения не только в основной системе уравнений, выражающих законы сохранения массы, количества движения и энергии, но и в начальных условиях и дополнительных соотношениях, применение которых диктуется необходимостью обеспечения адекватности разработанной математической модели исследуемому процессу [3].

Уравнения процесса для периода последействия использовались те же, что и в термодинамической модели.

При построении математической модели внутрибаллистического процесса были приняты следующие допущения.

1. Относительный приход газа в результате горения порохового заряда выражается уравнением, приближенно учитывающим отклонение действительного закона горения от геометрического.

2. Состав продуктов сгорания порохового заряда не меняется во время выстрела, следовательно, показатель адиабаты Пуассона *k=const.*

3. Свободный объем запульного пространства принимается за контрольный объем газа, контрольная поверхность которого проходит по поверхности канала вкладного ствола, гильзы и дна пули.

В периоде последействия контрольным объемом становится объем канала ствола.

4. Продукты горения - пороховые газы и несгоревший порох - равномерно распределены по запульному пространству.

5. Давление *p*, температура *T* и плотность ρ газа в запульном пространстве для каждого момента времени *t* равны их средним по контрольному объему значениям.

6. Процесс теплоотдачи стенкам ствола протекает в соответствии с законом Ньютона-Рихмана и определяется средними параметрами теплообмена.

7. Движение легкодеформируемой пули начинается при достижении давления выталкивания пули из дульца гильзы.

8. Прорыв пороховых газов и выброс несгоревших частиц пороха отсутствует.

9. В периоде последействия скорость движения газа в дульном срезе в первый момент равна скорости пули и в последующие моменты становится равной местной скорости звука по окончании переходного процесса, определяемого законами изменения количества движения и кинетической энергии порохового газа в канале ствола.

Задача определения параметров состояния газа в канале вкладного ствола сводится к численному решению замкнутой системы уравнений, представляющей собой математическую модель взаимосвязанных процессов, протекающих в канале вкладного ствола во время пиростатического и пиродинамического периодов, а также периода последействия. В основу математической модели внутрибаллистического процесса положена следующая система уравнений [3].

Уравнение изменения массы газа:

$$\frac{dm}{dt} = m_{\omega}\frac{d\psi}{dt} - S\rho V(l)N(l), \tag{1}$$

где $N(l) = \begin{cases} 1, & \text{если} \quad l \geq l_{д} \\ 0, & \text{если} \quad l < l_{д} \end{cases}$.

Уравнение относительного притока газа при горении заряда:

$$\frac{d\psi}{dt} = \begin{cases} \dfrac{1-(1-\psi_S)^{1-\beta}}{1-\beta} \cdot \dfrac{(1-\psi)^{\beta}}{J_k} \cdot p \cdot \Phi_{н}, & \text{если } \psi \leq 1; \\ 0, & \text{если } \psi > 1 \end{cases} \tag{2}$$

$$\Phi_{н} = \begin{cases} 1{,}05 - \exp\left(0{,}25 \cdot \dfrac{t}{t - 1{,}084 \cdot t_{пл}}\right), & \text{при } t < t_{пл}; \\ 1, & \text{при } t \geq t_{пл} \end{cases}$$

где ψ - относительная часть сгоревшего порохового заряда; $\Phi_{н}$ - функция неодновременности воспламенения порохового заряда; β - показатель степени закона изменения поверхности горения; J_k - импульс давления порохового газа к концу горения заряда; $t_{пл}$ - характерное время воспламенения всей поверхности горения порохового заряда.

Уравнение изменения внутренней энергии газа:

$$\frac{dU}{dt} = \Pi m_{\omega}\frac{d\psi}{dt} - p(0)S_3V_3 - p(l)S_nV(l)\cdot[1 - N(l)] - \frac{dQ}{dt} - \\ - \frac{dU_{гпс}}{dt} - \left[\left(k - 1 + \frac{p(l)}{p}\right)\frac{U}{m} + bp\right]S_{\partial}\rho V(l)N(L). \quad (3)$$

В отличие от аналогичного уравнения термодинамической модели [2], в данном уравнении введен учет расхода энергии газа на работу по перемещению затвора и газопороховой смеси.

Затраты энергии газа на перемещение газопороховой смеси определялись как изменение кинетической энергии газопороховой смеси за шаг интегрирования по времени в предположении о линейном распределении скорости газопороховой смеси по запульному пространству, т.е.

$$\frac{dU_{\text{гпс}}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(m_{\omega}\frac{u_{cp}^2}{2}\right) = \frac{m_{\omega}}{2}\frac{d}{dt}\left(u_{cp}^2\right) = m_{\omega}u_{cp}\frac{du_{cp}}{dt}, \quad (4)$$

где $u_{cp} = \frac{V(l) - V_3}{2}$.

Уравнение, определяющее потери энергии газа на теплоотдачу:

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha\cdot\frac{(T - T_{н})\cdot \mathrm{F} - \frac{4}{3\sqrt{\pi}\nu_{mc}}\cdot\left[\frac{8}{3} - \left(\frac{8}{3} - \frac{\nu_{mc}}{\nu_{mг}}\right)\cdot\frac{F_0}{F}\right]\cdot\frac{Q}{\sqrt{t}}}{1 + \alpha\cdot\frac{2}{2\sqrt{\pi}\nu_{mc}}\cdot\left[\frac{8}{15} + \left(\frac{\nu_{mc}}{\nu_{mг}} - \frac{8}{15}\right)\cdot\frac{F_0}{F}\right]\cdot\sqrt{t}}. \quad (5)$$

Уравнение движения пули в пиродинамическом периоде:

$$m_q\frac{dV(l)}{dt} = p(l)S_n - F_{\Sigma}. \quad (6)$$

Сила сопротивления перемещению пули при ее движении по каналу вкладного ствола F_{Σ} и площадь поперечного сечения пули $S_{\text{п}}$, на которую действует давление p(l) являются результатом решения задачи по определению параметров напряженно-деформированного состояния материала легкодеформируемой пули.

Уравнение изменения скорости газа в дульном срезе в периоде последействия:

$$\frac{dV(l)}{dt} = \frac{3S_{\partial}}{m}[p - p(l)] - \frac{S_{\partial}V^2(l)}{W}. \quad (7)$$

Уравнения изменения давления у дна пули в пиродинамическом периоде и в дульном срезе в периоде последействия:

$$p(l) = \frac{p}{1 + \frac{1}{3}\frac{m_{\omega}}{m_q}}, \qquad \text{если} \quad l < l_{\partial}; \quad (8)$$

$$\frac{dp(l)}{dt} = -p(l)\frac{S_{\partial}V(l)}{W}\left\{2 + \frac{1 - 2b\rho}{1 - b\rho} - \frac{6}{k}(1 - b\rho)\left[\frac{p}{p(l)} - 1\right]\right\}, \text{если } l \geq l_{\partial}. \quad (9)$$

Кинематическое уравнение для пули:

$$\frac{dl}{dt} = V(l)[1 - N(l)]. \quad (10)$$

Уравнение для давления газа на дно канала ствола:

$$p(0) = p\frac{1 + 0{,}5\frac{m_{\omega}}{m_q}}{1 + \frac{1}{3}\frac{m_{\omega}}{m_q}}. \quad (11)$$

Уравнение движения свободного затвора:

$$\left(m_з + m_г + \frac{1}{3}m_{вп}\right)\frac{dV_з}{dt} = p(0)S_з - \beta_1(\Pi_0 + cx_з) - P_э - F_т - F_{пр}. \qquad (12)$$

Кинематическое уравнение для затвора:

$$\frac{dx_з}{dt} = V_з. \qquad (13)$$

Уравнения для осредненных по объему величин давления, температуры и плотности газа:

$$p = (k-1)\frac{U}{W - bm}; \qquad (14)$$

$$T = (k-1)\frac{U}{R_\mu m}; \qquad (15)$$

$$\rho = \frac{m}{W}. \qquad (16)$$

Уравнение для коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{42}{W^{0,55}}\left\{\left(m_\omega \frac{d\psi}{dt}\right)^{0,65} + 3{,}1\cdot\left[S\rho V(l)\right]^{0,65}\right\}. \qquad (17)$$

Уравнения изменения свободного объема канала ствола и поверхности теплообмена:

$$W = W_\Delta - \frac{m_\omega}{S}(1-\psi) + \frac{\pi d_г^2}{4}x_з + \sum_i S_{ni}\Delta l_i; \qquad (18)$$

$$F = F_0 + 2\sqrt{\pi}\sum_i \sqrt{S_{ni}}\Delta l_i + \pi d_г x_з. \qquad (19)$$

Дополнительные соотношения:

$$Q_{wt} = Q_w + 0{,}35\cdot(T_н - 293); \qquad \Pi = \frac{4187\cdot \mathrm{T_w}}{T_w - 293}\cdot Q_{wt};$$

$$\mathrm{T_w} = 273 + 2{,}91\cdot Q_{wt};$$

$$k = 1{,}3 - 6{,}25\cdot 10^{-8}\cdot Q_{wt}^2;$$

$$R_\mu = \frac{k-1}{T_w}\cdot \Pi; \qquad \nu_{mг} = \frac{\lambda_{mг}}{\sqrt{a_{mг}}}; \quad \nu_{mc} = \frac{\lambda_{mc}}{\sqrt{a_{mc}}};$$

$$b = (1456 - 0{,}524\cdot Q_{wt});$$

$$\beta = \begin{cases} \sqrt{1 - \dfrac{3}{4 - 2\chi_1 + \chi_1^2}} & \text{- для порохов простой формы,} \\ 0{,}31 & \text{- для семиканальных порохов} \end{cases}$$

$$F_m = m_з \cdot \mathrm{g} \cdot \mathrm{f}_з.$$

$$P_э = \begin{cases} f\cdot p\cdot \pi\cdot d_г\cdot(l_г - x_з), & \text{при } \mathrm{x_з} < l_г \\ 0, & \text{при } \mathrm{x_з} \ge l_г \end{cases}.$$

Начальные условия интегрирования входящих в систему дифференциальных уравнений:

$$m_0 = 0{,}48\cdot m_{кк};$$

$$W_0 = W_\Delta - \frac{m_\omega}{\delta};$$

$$W_\Delta = \pi\cdot\frac{d^2}{4}\cdot\left(L_г - \frac{1}{3}\cdot d\right);$$

$$\rho_0 = \frac{m_0}{W_0};$$

$$T_0 = \frac{p_0}{R_в \cdot \rho_0};$$

$$U_0 = f_в \cdot m_{кн};$$

$$p_0 = \frac{U_0}{W_0}(k_в - 1);$$

$$\psi_o = 0;\ V_{з0} = 0;\ l_0 = 0;\ x_{з0} = 0;$$

$$U_{гпс0} = 0;\ Q_0 = 0;\ V(l)_0 = 0;$$

$$F_0 = \pi \cdot d \cdot (L_г + 0{,}25d);$$

$$F_{\Sigma 0} = f \cdot \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{E}{1-\mu} \cdot \frac{R_п^2 - R_д^2}{2} \cdot \frac{R_п^3 - R_д^3}{R_д^3}.$$

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет исследовать процесс функционирования табельного оружия со свободным затвором в режиме нелетального действия, с использованием вкладных стволов и специальных боеприпасов, а также проектировать специальные устройства, обеспечивающие дополнительные функции боевому оружию.

Список литературы

1. Патент № 21305731999 Котюхов Ф.А., Патрикова Е.Н. Способ перевода режима стрельбы штатного автоматического оружия и боеприпасы для его реализации. 1999.

2. Руководящие технические материалы. Оружие стрелковое. Методы термогазодинамических расчетов.// Тула, 1974. 160 с.

3. Патрикова Е.Н. Теоретико-экспериментальное обоснование возможности использования боевого оружия в режиме нелетального действия: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 134 с.

Патрикова Елена Николаевна, канд. техн. наук, доцент, elenapatrikova@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Патрикова Татьяна Сергеевна, канд. техн. наук, заведующий кафедрой, valeropatrik@yandex.ru, Россия, Тула, Институт повышения квалификации и профессиональной переподготовки работников образования тульской области,

Лосева Алена Александровна, студент, alenal0seva@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF THE OPERATING THE TIME WEAPON IN MODE NON-LETHAL ACTIONS

E.N. Patrikova, T.S. Patrikova, A.A. Loseva

In persisting work are presented results of mathematical modeling of the process of the operating the time weapon in additional mode non-lethal actions with use special device, providing reliability of the functioning(working) the automation of the weapon and performing the requirements on safe action.

Key words: special device, non-lethal action, safe action, highly flammable bullet, staff weapon.

Patrikova Elena Nikolaevna, candidate of technical science, docent, elenapatrikova@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Patrikova Tatyana Sergeevna, candidate of technical science, head of the department, valeropatrik@yandex.ru, Russia, Tula, Institute of improvement of professional skill and professional retraining of educators in the Tula region,

Loseva Alena Aleksandrovna, student, alenal0seva@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.455

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ОТДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ РЕАКТИВНОГО СНАРЯДА

К.И. Казаков, А.В. Смирнов, Н.В. Могильников, А.А. Ермаков

Рассматривается вариант расчета начального этапа отделения полезной нагрузки головной части реактивного снаряда. Приведена схема расчета возможности разрушения полезной нагрузки пассивными элементами двигателя.

Ключевые слова: математическое моделирование, движение твердого тела, внешняя баллистика.

В настоящее время достаточно распространенным вариантом компоновки головных частей реактивных снарядов (РС) являются головные части (ГЧ) с последовательно расположенными в корпусе элементами полезной нагрузки. В качестве полезной нагрузки могут использоваться не только боевые элементы различного целевого назначения, так и различные устройства для создания помех, проведения разведки и т. д. Наиболее выгодным вариантом компоновки полезной нагрузки будет вариант, при котором элементы полезной нагрузки располагаются последовательно и занимают полностью поперечное сечение корпуса ГЧ [1]. В то же время при подобном расположении возникает опасность соударения элементов полезной нагрузки, снабженных, как правило, парашютными системами торможения и стабилизации, с пассивными элементами РС – корпусом двигателя, обтекателем, поршнем и т.д.

Обычным вариантом технического решения, исключающего возможность соударения, является использование некоторой временной задержки вскрытия парашютного отсека, необходимой для обеспечения удаления элементов полезной нагрузки на безопасное расстояние [2]. Однако подобное техническое решение значительно усложняет конструкцию ГЧ, поскольку требует введения специальных пиротехнических устройств разделения с фиксированным временем задержки срабатывания и обеспечения задействования этих устройств в процессе разделения посредством предварительного заполнения свободных объемов продуктами горения пороховых зарядов. Использование подобных устройств весьма затруднительно для РС малого калибра.

В связи с этим представляет интерес оценка возможности разрушения полезной нагрузки пассивными элементами двигательной установки при различных траекторных параметрах в момент вскрытия ГЧ РС.

Для определенности рассмотрим вариант кумулятивно-осколочного боевого элемента (БЭ), имеющего систему стабилизации в виде ленточного парашюта и цилиндрический насадок на передней части [3]. Будем полагать, что элементы полезной

нагрузки с парашютными системами расположены в корпусе ГЧ с ориентацией парашютных систем вперед по направлению движения РС, при этом парашютная система каждого последующего элемента размещена в цилиндрическом насадке на передней части предыдущего.

Процесс вскрытия кассетной ГЧ начинается с момента начала воспламенения заряда разделения через требуемое время срабатывания временного механизма. В начале процесса РС движется на траектории с достаточно малыми углами атаки (менее 1º), поэтому на сборку действуют только сила давления пороховых газов в запоршневом объеме и аэродинамическая продольная сила, действующая на носовую часть сборки и стабилизатор ракетной части. Аэродинамическая поперечная сила практически равна нулю, из-за отсутствия угла атаки, поэтому сборка БЭ при выдвижении сохраняет целостность, разделения ее на отдельные элементы не происходит. Этому способствует также конструктивные особенности БЭ, при которых парашютный отсек данного БЭ размещен в цилиндрической полости предыдущего, а продольное усилие давления пороховых газов передается через корпуса БЭ.

После выхода поршня за пределы переднего торца РС, сборка БЭ получает дополнительную скорость $\Delta V_{ГЧ}$, направленную по вектору скорости РС, $\overline{V_c}$, в момент вскрытия, а ракетная часть – дополнительную скорость $\Delta V_{Р\times}$, так же направленную по вектору скорости РС, $\overline{V_c}$, но в противоположном направлении. Суммарная скорость сборки с БЭ после вскрытия будет равна $V_{ГЧ} = V_c + \Delta V_{ГЧ}$, ракетной части – $V_{РЧ} = V_c - \Delta V_{РЧ}$, а относительная скорость разделенных частей $\Delta V = \Delta V_{ГЧ} + \Delta V_{РЧ}$. Угол наклона вектора скорости практически не изменится.

Сами значения $\Delta V_{ГЧ}$ и $\Delta V_{РЧ}$ зависят от соотношения их масс, от величины форсирования и массы заряда разделения.

В процессе дальнейшего движения на РЧ действует увеличенная продольная сила из-за отсутствия обтекателя. Наличие оперения, как правило, обеспечивает сохранение устойчивости РЧ на траектории, но из-за уменьшения массы и увеличения продольной силы скорость движения РЧ уменьшается быстрее, кривизна траектории возрастает.

В это же время на сборку БЭ действует только аэродинамическая сила и сила тяжести, под действием которых скорость сборки уменьшается, траектория искривляется, и возникает угол атаки, который быстро увеличивается из-за действия опрокидывающего момента (движение сборки в этот момент является неустойчивым, поскольку центр давления располагается в зоне обтекателя, а центр масс в средней части сборки). При достижении некоторого критического значения угла атаки, сборка БЭ разделяется на отдельные БЭ, в которых вскрываются парашютные системы, и происходит их торможение на траектории.

В процессе торможения БЭ возможен их догон и повреждение элементами двигателя РС.

Разделение сборки на отдельные БЭ начинается с отделения обтекателя и вскрытия парашютного отсека переднего БЭ. В этот момент происходит раскрытие парашютной системы переднего БЭ, что приводит к его повороту и вскрытию парашютной системы следующего БЭ и т.д.

Вскрытие парашютной системы первого БЭ происходит не мгновенно, после потери контакта сборки с РЧ, а спустя некоторое время, которое требуется для возникновения угла атаки (за счет искривления траектории) и нормальной силы, связанной с этим углом, достаточной для опрокидывания обтекателя с крышкой парашютного отсека. Кроме того, требуется время на сам процесс опрокидывания обтекателя. Аналогично происходит задержка вскрытия парашютного отсека следующего БЭ, однако здесь время задержки включает только время на опрокидывания предыдущего БЭ и вскрытие крышки парашютного отсека данного БЭ.

Для детального исследования процесса необходимо предварительно провести аэродинамический расчет разделенных элементов – корпуса РЧ без обтекателя, сборки БЭ и изолированного БЭ с парашютной системой.

При расчете аэродинамических характеристик изолированного БЭ с парашютной системой необходимо иметь в виду, что движение на траектории БЭ можно рассматривать как движение твердого тела, снабженного безинерционным парашютом. В этом случае для парашюта необходимо определить только значение коэффициента продольной силы, а для БЭ весь комплекс аэродинамических коэффициентов с учетом возможности его движения под большими углами атаки. В этом случае будет суммироваться значение только силы лобового сопротивления парашюта и БЭ.

Указанные аэродинамические коэффициенты рассчитывались по программе [3], использующей аппроксимацию экспериментальных данных.

Полное время разделения сборки на отдельные БЭ, t_{sp}, после выхода за передний срез корпуса РЧ включает следующие составляющие:

$$t_{sp} = t_{ob} + (N-1)(t_{np} + t_r);$$

где N – число БЭ в ГЧ; t_{ob} – время сбрасывания обтекателя с крышкой парашютного отсека; t_{np} – время наполнения парашютной системы; t_r – время разворота БЭ на 180º под действием парашютной системы.

В свою очередь, время t_{ob} можно представить как сумму:

$$t_{ob} = t_{ob1} + t_{ob2},$$

где t_{ob1} - время до момента начала разворота обтекателя; t_{ob2} - время разворота обтекателя. Будем полагать, что $t_{ob2} \approx t_r$, т.е. время разворота обтекателя примерно равно времени разворота БЭ под действием парашютной системы.

В момент начала процесса разделения сборки ее ориентация относительно вектора скорости будет характеризоваться небольшим углом атаки, который возникает из-за наличия кривизны траектории. Будем полагать, что значение этого угла не превосходит $\alpha_0 = 0{,}01$ рад, т.е. менее одного градуса. Больший угол ускорит процесс разделения, поэтому минимальное значение угла атаки является наиболее опасным, с точки зрения увеличения времени процесса.

При наличии угла атаки α_0 на сборку будут действовать продольная X и нормальная Y силы, значения которых определятся из следующих соотношений:

$$X = 0{,}5\rho V^2 S_m C_x; \qquad Y = 0{,}5\rho V^2 S_m C_y^{\alpha}\alpha,$$

где ρ – плотность воздуха; V – скорость РС; $S_m = \pi d^2/4$ площадь миделя; C_x, C_y^{α} – аэродинамические коэффициент продольной силы и производная коэффициента нормальной силы по углу атаки.

Суммарная аэродинамическая сила будет приложена в центре давления на расстоянии $x_c = C_d l_c$, относительно носка обтекателя, и направлена относительно продольной оси под углом:

$$\eta = arctg(Y/X) = arctg(C_y^{\alpha}\alpha / C_x).$$

Время начала разворота обтекателя будет соответствовать моменту, когда суммарная аэродинамическая сила будет пересекать опорную поверхность контакта обтекателя с БЭ по внешнему диаметру, то есть:

$$\eta = \eta_{kr} = arctg\left(\frac{0{,}5d_1}{l_{ob} - C_d l_c}\right),$$

где d_1 – внешний диаметр контакта обтекателя с БЭ, $d_1 = 76$ мм; l_{ob} – длина обтекателя с крышкой парашютного отсека, l_{ob} = 160 мм.

Таким образом, время начала разворота соответствует критическому значению угла атаки сборки α_{kr}, который определится как:

$$\alpha_{kr} = \frac{0{,}5 d_1 C_x}{(l_{ob} - C_d l_c) C_y^{\alpha}}.$$

Рассмотрим два варианта граничных значений скорости ГЧ в момент разделения $V_{ГЧ} = 0{,}5 M_\infty$ и $V_{ГЧ} = 1{,}4 M_\infty$, где M_∞ – число Маха.

Результаты расчета критического угла атаки, показывают, что при изменении скорости РС в достаточно широком диапазоне, значение критического угла атаки, соответствующего моменту начала сбрасывания обтекателя изменяется незначительно и его можно принять постоянным значением, соответствующим возникновению угла атаки при движении сборки БЭ равном α_{kr} =0,28 рад.

Время, соответствующее возникновению критического угла атаки сборки БЭ, можно определить из решения дифференциального уравнения вращательного движения сборки БЭ, полученного в предположении постоянства аэродинамических параметров в рассматриваемый момент и движения в плоскости угла атаки:

$$J_{zz} \frac{d^2\alpha}{dt^2} = 0{,}5 \rho V^2 S_m m_z^{\alpha} \alpha,$$

для начальных условий: $t = 0$; $d\alpha / dt = 0$; $\alpha = \alpha_0 = 0{,}01$.

Результаты численного решения данного уравнения в зоне нахождения критического значения угла атаки α_{kr} показывают, что время достижения критического значения угла разворота сборки БЭ соответствует при $V = 0{,}5 M_\infty$ значению t_{ob1}=0,251 с, а при $V = 1{,}4 M_\infty$ значения t_{ob2} =0,119 с.

Время разворота БЭ под действием парашютной системы t_r можно определить из решения дифференциального уравнения вращательного движения БЭ:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{F_{pc} Z}{J_{Zbe}},$$

при следующих начальных условиях: $t = 0$: $d\alpha / dt = 0$; $\alpha = 0$, откуда:

$$\alpha = \frac{F_{nc} Z}{J_{Zbe}} t^2, \quad \text{или при } \alpha = 3{,}14, \; t_r = \sqrt{\frac{3{,}14 J_{Zbe}}{F_{nc} Z}}.$$

В приведенном выражении $F = 0{,}5 \rho V^2 S_{nc} C_{xnc}$ – сила торможения парашютной системы, S_{nc} – площадь парашюта; C_{xnc} – коэффициент сопротивления парашюта; Z – расстояние от центра масс БЭ до точки крепления парашюта, J_{Zbe} – момент инерции БЭ относительно экваториальной оси.

Время наполнения парашютной системы t_{np} можно оценить приближенно как время перемещения БЭ на расстояние равное максимальному габариту парашютной системы. Результаты расчетов показывают, что это время достаточно мало по сравнению с временем t_r разворота БЭ.

Проведенные результаты расчетов позволяют определить время t_{ai} и координаты X_{ai}, Y_{ai} точек начала автономного движения каждого из БЭ, в предположении постоянства скорости сборки в процессе разделения и оценить возможность столкновения РЧ с БЭ в процессе их автономного движения.

В момент разделения сборки БЭ с направление вектора скорости разделяемых частей будет одинаково, но скорость РЧ будет меньше скорости сборки: $V_{РЧ} = V_{ГЧ} - (\Delta V_{РЧ} + \Delta V_{ГЧ})$, где относительная скорость $(\Delta V_{РЧ} + \Delta V_{ГЧ}) = 40,\ldots,70$ м/с.

В результате траектория РЧ будет располагаться ниже траектории сборки БЭ до момента начала их автономного движения. После начала автономного движения, скорость БЭ будет быстро уменьшаться, траектория БЭ пересечет траекторию РЧ. Однако столкновение возможно только тогда, когда момент времени пересечения траекторий по высоте совпадает с моментом времени пересечения траекторий по дальности.

Очевидно, что наиболее вероятным является столкновения БЭ, ближе всех расположенного к траектории полета РЧ, т.е. БЭ, расположенного за обтекателем. Также наиболее опасными является минимальная разность скоростей ГЧ и РЧ, и угол наклона траектории в момент разделения близкий к нулю.

Рассмотрим траектории движения РЧ и БЭ для этих условий. В момент потери контакта с РЧ скорость относительного движения сборки превышает скорость РЧ, которая в этот момент имеет большее аэродинамическое сопротивление и ее траектория проходит ниже траектории сборки БЭ. В дальнейшем происходит отделение БЭ и вскрытие их парашютных систем торможения и стабилизации, БЭ тормозятся и их траектория обязательно пересечет траекторию движения ракетной части.

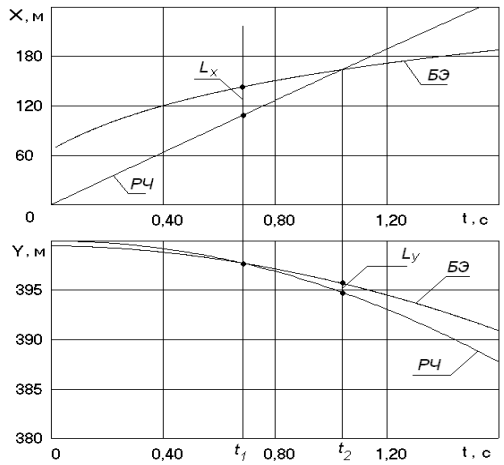
В то же время наличие пересечения траекторий не обязательно приводит к столкновению РЧ и БЭ.

На рис. приведены графики изменения высоты и дальности от времени для РЧ и первого БЭ для одного из вариантов ГЧ.

Из рис. видно, что пересечение траекторий движения РЧ и БЭ по дальности и по высоте происходит в различные моменты времени t_1 и t_2. Так в момент t_1, когда высота траекторий одинакова, расстояние между РЧ и БЭ по горизонтали будет равно L_X, а в момент t_2, когда одинакова дальность, расстояние по высоте будет равно L_Y. Значения L_X и L_Y представляют собой параметры максимального сближения траекторий и позволяют оценить возможность столкновения РЧ и БЭ.

Для определения значений максимального сближения в зависимости от условий в момент вскрытия кассетной ГЧ были проведены расчеты для различных вариантов начальных условий для первого и последнего БЭ (шестого) в сборке. Расчеты проводились для минимальной скорости разделения $(\Delta V_{РЧ} + \Delta V_{ГЧ}) = 40$ м/с.

Предварительный анализ результатов расчета, приведенных в табл. 1, показывает, что наиболее опасное сближение соответствует углам наклона траектории близки к нулю, и максимальным скоростям РС в момент разделения. Во всех случаях максимальное сближение соответствует начальному участку движения БЭ после отделения.



Зона пересечения траекторий РЧ и БЭ

Учитывая небольшое время до момента максимального сближения, можно считать, что углы наклона траектории в момент максимального сближения незначительно отличаются от начальных углов θ_C. В этом случае можно считать, что столкновение происходит, если РЧ и БЭ сближаются на расстояние меньше критического по вертикали L_{Ykr} или горизонтали L_{Xkr}, причем критические значения определяются максимальными габаритами элементов и углами наклона траектории.

Результаты расчета

V_C, м/с	θ_C, град	№ БЭ	t_1, с	$X_{БЭ}$, м	$X_{РЧ}$, м	L_X, м	t_2, с	$Y_{БЭ}$, м	$Y_{РЧ}$, м	L_Y, м
200	0	1	0	66,6	53,1	13,5	0,454	398,7	398,5	0,2
		6	0	106,8	84,9	21,9	0,565	398,3	398,0	0,3
	-20º	1	0,084	76,7	62,7	14,0	0,454	373,0	355,7	17,3
		6	0,134	99,9	121,7	21,8	0,568	360,9	337,1	32,8
	-40º	1	0,084	51,0	62,5	11,5	0,444	355,9	319,1	36,8
		6	0,134	81,5	99,1	17,6	0,554	328,7	286,1	42,6
480	0	1	0	73,0	66,4	6,6	0,086	399,5	399,5	0,0
		6	0	113,8	103,1	10,7	0,112	399,4	399,5	0,1
	-20º	1	0,014	72,9	68,2	4,7	0,086	374,9	364,1	10,8
		6	0,021	115,2	105,5	9,7	0,112	360,8	346,9	13,9
	-40º	1	0,014	59,7	55,6	4,1	0,086	353,0	332,7	20,3
		6	0,021	94,2	86,1	8,1	0,112	326,6	301,2	25,4

Опасным сближением, с точки зрения возникновения столкновения БЭ и РС будет такое, при котором величина сближения будет меньше полусуммы максимального габарита БЭ и диаметра РЧ. Результаты расчетов, приведенные в табл., указывают, что подобное условие выполняется только для варианта вскрытия в момент горизонтальной ориентации РС в момент вскрытия. Подобное условие можно считать наиболее опасным, независимо от относительной скорости движения разделяемых элементов РС.

Снижению вероятности столкновений БЭ с РЧ будет способствовать увеличение дополнительной скорости РЧ и сборки БЭ при разделении, однако более правильным является выбор начальных условий пуска РС, при которых исключаются нулевые углы наклона траектории в точке разделения.

Список литературы

1. Макаровец Н.А., Денежкин Г.А., Козлов В.И., Редько А.А. Экспериментальное моделирование и отработка систем разделения снарядов залпового огня. Тула: ФГУП «ГНПП «Сплав», 2005. 216 с.

2. Макаровец Н.А., Авотынь Б.А., Панасюк М.Ю., Устинов Л.А. Эффективность и надежность систем вооружения. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. 528 с.

3. Долганов М.Е., Воротилин М.С., Могильников Н.В., Фомичева О.А. Программа расчета параметров пространственного движения элемента с парашютной стабилизацией // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 11. Ч. 2. С. 112 – 117.

Казаков Константин Игоревич, главный конструктор направления АВ, alexey140Erm@yandex.ru, Россия, Тула, АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева»,

Смирнов Александр Владимирович, генеральный директор, alexey140Erm@yandex.ru, Россия, Тула, АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева»,

Могильников Николай Викторович, д-р техн. наук, профессор, alexey140Erm@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ермаков Алексей Александрович, аспирант, alexey140Erm@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

CALCULATION OF THE PROCESS SEPARATION PAYLOAD OF THE HEAD ROCKET PROJECTILE

K.I. Kazakov, A.V. Smirnov, N.V. Mogilnikov, A.A. Ermakov

A variant of calculating the initial stage of separation payload of the head projectile is considered. The scheme for calculating the possibility of destruction payload by passive engine elements is given.

Key words: mathematical modelling, motion of a rigid body, external ballistics.

Kazakov Konstantin Igorevich, chief designer of the AA direction, alexey140Erm@yandex.ru, Russia, Tula, «JSC «NPO» SPLAV» them. A.N. Ganicheva»,

Smirnov Alexander Vladimirovich, general director, alexey140Erm@yandex.ru, Russia, Tula, «JSC «NPO» SPLAV» them. A.N. Ganicheva»,

Mogilnikov Nikolay Viktorovich, doctor of technical sciences, professor, alexey140Erm@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Ermakov Alexey Aleksandrovich, postgraduate, alexey140Erm@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 623.526

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ СТВОЛОВ ОРУЖИЯ И ВЛИЯНИЯ ЕГО НА НАЧАЛЬНУЮ СКОРОСТЬ СНАРЯДА

А.М. Пушкарёв, И.Г. Вольф, И.И. Ихтисанов

Рассматривается вопрос о влиянии теплового состояния стволов автоматического оружия на начальную скорость снаряда. Найдена регрессионная зависимость между средней температурой ствола и начальной скоростью снаряда. Предложен способ расчета средней температуры ствола при его нагреве от стрельбы. Проведены исследования оценки влияния теплового состояния стволов оружия на начальную скорость снаряда.

Ключевые слова: автоматическое оружие, артиллерийский ствол, тепловое состояние ствола, начальная скорость снаряда.

Одной из тенденций развития современного автоматического артиллерийского оружия является предъявление повышенных тактико-технических требований к создаваемым и модернизируемым системам данного вида оружия. При решении подобных задач следует учитывать, что любое оптимальное решение должно отыскиваться в некоторой области возможных изменений управляемых параметров. Учет изменения управляемых параметров не только обеспечивает достижение более высоких тактико-технических характеристик оружия, но и позволяет реализовать адаптивные режимы применения автоматического оружия. В связи с этим существует объективная необходимость развития и оптимизации параметров автоматического оружия с учетом изме-

няющихся условий боевого применения. Важная роль при этом отводиться совершенствованию, как конструкции автоматического артиллерийского оружия, так и алгоритмам его эффективного функционирования.

Эффективность функционирования автоматического оружия, в частности, малокалиберных автоматических пушек определяется комплексом величин, среди которых наиболее значимыми являются: калибр, начальная скорость, баллистический коэффициент снаряда, темп стрельбы, кучность и меткость, временные интервалы между очередями выстрелов [1]. Исследования последних лет показывают, что успешная модернизация существующих и разработка новых малокалиберных автоматических пушек с напряженным режимом стрельбы (высоким темпом, большой длиной очереди и малым временем перерыва между очередями) зависит в большой степени от успешного решения проблемы нагрева агрегата ствола оружия. Интенсивный нагрев материала стали ствола малокалиберных автоматических пушек является тем явлением, которое существенно ограничивает технические и баллистические характеристики оружия, а также сужает диапазон его боевого применения. Поэтому проблема установления закономерностей влияния теплового состояния ствола на баллистические характеристики ствольных систем, в частности, на начальную скорость снаряда в настоящее время остается актуальной. Здесь необходимо отметить, что начальная скорость снаряда относится к числу важнейших управляемых параметров, существенно влияющих на боевую эффективность автоматического оружия [2].

При определении влияния теплового состояния ствола на баллистические характеристики малокалиберных пушечных комплексов необходимо определить, во-первых, в какой мере будут эффективны традиционные методы исследования теплофизического нагружения ствола, и, во-вторых, какие новые методики для этого можно рекомендовать. И в том и в другом случае существует объективная необходимость исследования температурного поля агрегата ствола, разогретого стрельбой.

Из практики стрельбы известно, что кучность и стабильность средней точки попадания относятся к основным показателям, определяющим эффективность стрельбы из автоматического оружия (имеются в виду продольная и поперечная составляющие) [1]. Следует отметить, что значительное влияние на данные показатели оказывает одинаковость начальных скоростей снарядов. При увеличении или уменьшении начальной скорости снаряда средняя точка попадания будет смещаться относительно контрольной точки соответственно вверх или вниз. Поэтому одним из требований к стволам оружия является обеспечение заданной начальной скорости снаряда [3]. Следует отметить, что непрерывное совершенствование автоматического оружия сопровождается повышением начальной скорости снаряда, максимального давления пороховых газов, повышением темпа стрельбы, что ведет к интенсивному разогреву ствола во время стрельбы. Нагрев стволов оказывает отрицательное влияние на результаты стрельбы, вызывая падения начальной скорости снаряда, ухудшая кучность и точность стрельбы. Вследствие нагрева ствола изменяются условия ведения снаряда по нарезам, увеличивается зазор между стенками ствола и ведущими частями снаряда. Так при нагреве ствола до 400°С зазор между центрующим утолщением снаряда и вершинами полей нарезов может возрастать больше чем в два раза. Опытными данными установлено, что при нагреве ствола в дульной части до 300…400 °С кучность стрельбы падает в два-три раза [4].

Такие выдающиеся ученые, как А.А. Благонравов, М.Е. Серебряков, Э.К. Ларман, Б.В. Орлов, отмечали в своих работах, что одним из существенных факторов, влияющих на начальную скорость снаряда, является нагрев ствола. Однако в существующей на данный момент литературе не описаны аналитические или эмпирические зависимости начальной скорости снаряда от температуры ствола. Для исследования влияния теплового состояния ствола на начальную скорость снаряда были проведены исследования, в результате которых получена регрессионная модель, описывающая зависимость начальной скорости снаряда от средней температуры ствола. Так, например, для малокалиберной автоматической пушки уравнение регрессии V на T имеет вид:

$$V(T) = 851{,}93 + 0{,}01T - 9{,}33 \cdot 10^{-5} T^2, \quad (1)$$

где V – начальная скорость снаряда, м/с; T – средняя температура артиллерийского ствола, К.

На рис. 1 указанная зависимость отображена графически.

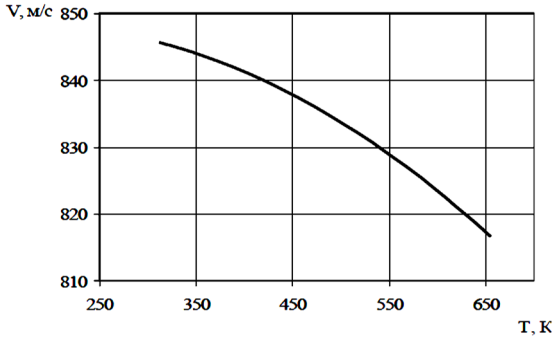


Рис. 1. Зависимость начальной скорости снаряда от средней температуры ствола

Выражение (1) позволяет прогнозировать падение начальной скорости снаряда в результате нагрева ствола от стрельбы и, следовательно, снижение траектории снаряда и смещение средней точки попадания относительно контрольной точки цели.

Нагрев ствола от стрельбы может быть рассчитан численно или аналитически. В настоящее время для артиллерийских стволов имеется целый ряд методик теплового расчета в разной мере пригодных для решения задач теплового проектирования. В данных методиках линейное уравнение нестационарной теплопроводности в стенке ствола решается аналитически как составная часть задачи о термонапряженном состоянии поверхности канала ствола. Однако при всех достоинствах и наглядности аналитических методов они не позволяют решить задачу в нелинейной кинетической постановке. Поэтому единственным приемлемым аппаратом оценки влияния нагрева стволов малокалиберного автоматического оружия на начальную скорость снаряда, являются численные методы.

С этой целью предлагается усовершенствованный алгоритм расчета средней температуры ствола при его нагреве от стрельбы на основе численного решения уравнений теплопроводности [5].

Задача о нагреве гладкого цилиндрического ствола пороховыми газами описывается уравнением:

$$\frac{\partial T(r,\tau)}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 T(r,\tau)}{\partial \tau^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T(r,\tau)}{\partial \tau}\right). \quad (2)$$

При решении этого уравнения применительно к артиллерийскому стволу малокалиберной автоматической пушки граничные условия обычно записываются в следующем виде:

$$\lambda \frac{\partial T(r_1,\tau)}{\partial \tau} = \alpha_\Gamma (T_1 - T_\Gamma); \quad \lambda \frac{\partial T(r_2,\tau)}{\partial \tau} = -\alpha_B (T_2 - T_B), \quad (3)$$

на внутренней и наружной поверхностях артиллерийского ствола соответственно.

Начальные условия при равномерном распределении температуры по толщине стенок ствола имеют вид:

$$T(r,0) = T_0, \quad (4)$$

где r_1 – радиус канала ствола, м; r_2 – наружный радиус артиллерийского ствола, м; τ – время теплового воздействия, с; a – коэффициент температуропроводности материала, из которого изготовлен ствол, м^2/с; λ – коэффициент теплопроводности материала, из которого изготовлен ствол, Вт/м·К; α_Γ – коэффициент теплоотдачи пороховых газов, Вт/м^2·К; α_B – коэффициент теплоотдачи воздуха, Вт/м^2·К; T – температура

в точке ствола, соответствующая окружности радиуса r, К; T_1 – температура на внутренней поверхности ствола, К; T_2 – температура на наружной поверхности ствола, К; $T_Г$ – температура пороховых газов, К; T_0 – температура ствола до начала нагрева, К.

В результате решения уравнения (2) с краевыми условиями (3), (4) методом конечных разностей можно получить зависимости температуры в любой точке поперечного сечения ствола от координаты этой точки при различных условиях. К числу этих условий относятся: температуры пороховых газов и воздуха, коэффициенты теплоотдачи пороховых газов и воздуха, время воздействия пороховых газов на поверхность канала ствола, время между выстрелами в очереди и между очередями, наружный и внутренний радиусы ствола, а также плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала, из которого изготовлен артиллерийский ствол.

На рис. 2 отображено тепловое состояние сечения ствола (характер изменения температуры на глубину 0,8 мм) малокалиберной автоматической пушки 2А42 после 1, 30, 60 и 90 выстрелов. Исходными данными при моделировании были: $T_Г$ = 2460 К; T_0 = 300 К; $T_В$ = 300 К; λ = 41,8 Вт/м·К; c = 500 Дж/кг·К; ρ = 8000 кг/м^3; $\alpha_Г$ = 11400 Вт/м^2·К; $\alpha_В$ = 1000 Вт/м^2·К.

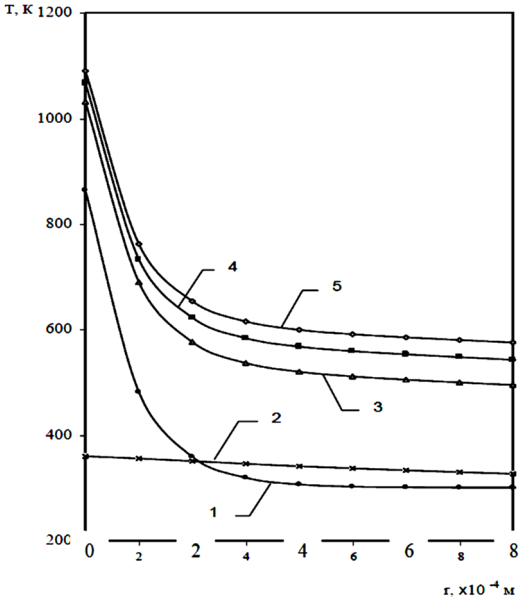


Рис. 2. Распределение температуры по толщине стенки ствола на глубину 0,8 мм

Здесь кривая 1 соответствует нагреву ствола от одного выстрела при $\tau = 1{,}37 \cdot 10^{-3}$ с. Темп стрельбы равен шестистам выстрелам в минуту. Время между выстрелами τ_1, когда ствол не подвержен тепловому воздействию пороховых газов, рассчитывается по формуле:

$$\tau_1 = 60/n_T - \tau,$$

где $n_Т$ – техническая скорострельность оружия, выстр./мин.; τ – время теплового воздействия пороховых газов на стенки ствола, с.

В рассматриваемом случае τ_1 составляет $9{,}87 \cdot 10^{-2}$ с, что в 71,99 раза превышает τ. За это время в результате теплопроводности характер распределения температуры по толщине стенки ствола значительно изменится – кривая 2. Видно, что перепад температуры по толщине стенки стал невелик, температура внутренней поверхности ствола значительно снизилась. Следовательно, в момент следующего выстрела разница ($T_Г$ – T_1) будет больше, чем в случае расчета теплового состояния ствола без учета перераспределения температуры в период времени τ_1, и ствол получит большее количество тепла. Кривые 3, 4, и 5 на рис. 2 отображают тепловое состояние ствола после 30, 60 и 90 выстрелов соответственно.

Зная распределение температуры по толщине стенки, можно найти среднюю температуру в сечении, как сумму температур каждого *i*-го слоя, помноженных на свои массовые коэффициенты k_i:

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^{n} T_i k_i ,$$

где $T_{ср}$ – средняя температура сечения, К; T_i – температура *i*-го слоя, К; *n* – количество слоев; k_i – массовый коэффициент *i*-го слоя;

$$k_i = \frac{r_{i+1/2}^2 - r_{i-1/2}^2}{r_1^2 - r_2^2},$$

где $r_{i+1/2}$ – внешний радиус *i*-го слоя, м; $r_{i-1/2}$ – внутренний радиус *i*-го слоя, м; r_1 – радиус канала ствола, м; r_2 – наружный радиус ствола, м.

Расчет средней температуры ствола по предложенной методике в сочетании с зависимостью (1) дает возможность прогнозировать падение начальной скорости снаряда от нагрева ствола при различных режимах стрельбы.

Таким образом, разработанный алгоритм, основываясь в большей степени, чем существующие, на физических представлениях о процессах, происходящих в толщине стенки ствола при выстреле, создает методическую основу для разработки общего подхода к анализу работоспособности поверхностного слоя канала ствола автоматического артиллерийского оружия различного типа, который в большей степени, чем существующие эмпирические зависимости, отражает последствия процессов воздействия выстрела на поверхность канала ствола, точнее учитывает условия боевой эксплуатации оружия.

Список литературы

1. Шипунов А.Г., Грязев В.П. и др. Эффективность и надежность стрелково-пушечного вооружения. Тула: Изд-во ТулГУ, 2002. 197 с.

2. Шерешевский М.С., Гонтарев А.Н., Минаев Ю.В. Эффективность стрельбы из автоматического оружия. М.: ЦНИИ информации, 1979. 328 с.

3. Голомбовский А.К. и др. Теория и расчет автоматического оружия. Пенза: ПВАИУ, 1973. 493 с.

4. Орлов Б.В., Ларман Э.К., Маликов В.Г. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий. М.: Машиностроение, 1976. 431 с.

5. Пушкарёв А.М., Ихтисанов И.И. Особенности учета режима стрельбы автоматической пушки при моделировании процессов теплообмена в канале ствола // Тематический сборник № 57 54-ой Международной военно-научной конференции. Ч.1. СПб.: Изд-во МВАА, 2020. С. 230-235.

Пушкарёв Александр Михайлович, канд. техн. наук, профессор, alex.pushkarev2018@yandex.ru, Россия, Пермь, Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации,

Вольф Илья Григорьевич, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры, ilvolf@yandex.ru, Россия, Пермь, Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации,

Ихтисанов Ильнар Ильдарович, преподаватель, alfione83@mail.ru, Россия, Пермь, Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации

STUDY OF THE THERMAL STATE OF THE WEAPON BARRELS AND ITS EFFECT ON THE INITIAL VELOCITY OF THE PROJECTILE

A.M. Pushkaryov, I.G. Volf, I.I. Ikhtisanov

The issue of the influence of the thermal state of the barrels of automatic weapons on the initial speed of the projectile is being considered. A regression relationship was found between the average barrel temperature and the initial velocity of the projectile. Method is proposed for calculation of average barrel temperature at its heating from firing. Studies conducted to assess the effect of the thermal state of weapon barrels on the initial velocity of the projectile.

Key words: automatic weapons, artillery barrel, thermal state of the barrel, starting speed of the projectile.

Pushkaryov Aleksander Mikhailovich, candidate of technical sciences, professor, alex.pushkarev2018@yandex.ru, Russia, Perm, Perm Military Institute of the National Guard's Forces of the Russian Federation,

Volf Ilya Grigorievich, candidate of technical sciences, docent, head of the department, ilvolf@yandex.ru, Russia, Perm, Perm Military Institute of the National Guard's Forces of the Russian Federation,

Ikhtisanov Ilnar Ildarovich, lecturer, alfione83@mail.ru, Russia, Perm, Perm Military Institute of the National Guard's Forces of the Russian Federation

УДК 621.455.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ

М.В. Арсентьева

Рассматриваются вопросы очагового воспламенения поверхности топлива конденсированной частицей. Представлены результаты численного моделирования процесса нагрева топлива. Получена область значений параметров частиц, способных образовывать очаги воспламенения.

Ключевые слова: моделирование, внутренняя баллистика, воспламенение.

При работе ракетного двигателя твердого топлива в камере сгорания образуется двухфазное рабочее тело. Продукты сгорания топлива содержат конденсированные частицы, которые увлекаются потоком газа. В общем случае при движении гетерогенного потока в камере двигателя имеет место разность скоростей и температур газа и частиц. Ускорение частиц к-фазы происходит под действием аэродинамических сил, обусловленных разностью скоростей, а передача теплоты между частицами и газом – из-за разности температур [1, 2].

В процессе численного моделирования подобных течений основные сложности связаны с описанием следующих процессов [3]:

– взаимодействие дисперсной фазы с турбулентным газовым потоком;

– обратное влияние дисперсной фазы на турбулентность;

– взаимодействие частиц дисперсной фазы с твердой стенкой камеры и поверхностью топливного элемента;

– взаимодействие конденсированных частиц друг с другом;

– изменение размеров частиц вследствие горения, дробления и коагуляции;

– влияние турбулентных флуктуаций на скорости гетерогенного горения и фазовых переходов.

Для описания взаимодействия частиц с твердой стенкой или поверхностью топлива необходимо учитывать свойства дисперсной фазы, в частности, горящие или негорящие частицы, их плотность и т.п. Коэффициенты восстановления (потери) импульса и тепла, а также угол отскока твердой частицы от поверхности зависят от скорости частиц, шероховатости поверхности, соотношения твердостей материалов стенки и к-фазы [4].

Основными факторами, вызывающими осаждения твердых частиц к-фазы на стенку, являются инерция частиц, броуновская и турбулентная диффузии, турбулентная миграция частиц из-за взаимодействия их с турбулентными вихрями несущего газового потока, силы термо- и электрофореза, внешние массовые силы, поперечные силы за счет сдвига средней скорости несущего потока (сила Сэфмана) и вращение частиц (сила Магнуса) и т.д.

Анализ взаимодействия частиц с ограничивающей гетерогенный поток поверхностью позволяет сформулировать граничные условия для уравнений движения и теплопереноса конденсированной фазы.

Для оценки воспламенительной способности конденсированных частиц, образующихся при горении дымного пороха, проводилось численное моделирование процесса нагрева поверхности топлива раскаленной частицей [5].

При контакте с поверхностью частицы, имеющей высокую температуру, происходит нагрев тонкого слоя до температуры газификации, при этом между частицей и топливом образуется газовая прослойка, определяющая теплопередачу от частицы к топливу (рис. 1).



а ***б***

Рис. 1. Схема очагового воспламенения топлива:
а – возникновение очага воспламенения; б – эволюция очага во времени;
1 – твердая частица; 2 – топливо; 3 – фронт газификации топлива

Для получения предельных характеристик воспламенения поверхности топлива в окрестностях осевшей частицы процесс теплопроводности рассматривается в сферической системе координат, в предположении, что частица представляет собой сферу с радиусом $r_{\text{ч}}$, погруженную в топливо и тепловой поток от частицы к топливу следует ньютонианской зависимости [6, 7].

Система уравнений в этом случае выглядит следующим образом:

а) для частицы:

$$\frac{\partial T_{\text{ч}}}{\partial t} = a_{\text{т}}\left(\frac{\partial^2 T_{\text{ч}}}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right),$$

начальное условие:

$$t = 0;\ T_{\text{ч}}(r,0) = const = T_{\text{ч}0},$$

граничное условие:

$$r = r_{\text{ч}};\ \alpha(T_{\text{чп}} - T_{\text{п}}) = -\lambda_{\text{ч}}\cdot\left(\frac{\partial T_{\text{ч}}}{\partial r}\right)_{r=r_{\text{ч}}};$$

б) для топлива:

$$\frac{\partial T_{\text{т}}}{\partial t} = a_{\text{т}}\left[\frac{\partial^2 T_{\text{т}}}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin\theta}\cdot\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial T_{\text{т}}}{\partial\theta}\right)\right],$$

начальное условие:

$$t = 0;\ T_{\text{т}}\left(r\cdot\sin\theta,0\right) = const = T_S,$$

граничное условие:

$$r = r_{\text{п}};\ \alpha\left(T_{\text{чп}} - T_{\text{п}}\right)\frac{r_{\text{ч}}^2}{r_{\text{п}}^2} = -\lambda_{\text{т}}\left(\frac{\partial T_{\text{т}}}{\partial r}\right)_{r=r_{\text{п}}},\quad r = \infty;\ T_{\text{т}} = T\left(r\cdot\sin\theta,0\right).$$

Начальное условие для топлива выражает распределение температуры в поверхностном слое заряда, сложившееся под воздействием теплового потока, подводимого к данному участку поверхности, до попадания на него частицы. Граничное условие при $r = \infty$ соответствует начальному распределению температуры. Такая запись граничного условия предполагает отсутствие теплового взаимодействия между соседними очагами воспламенения.

Граничные условия при $r = r_{\text{ч}}$ (радиус частицы) и при $r = r_{\text{П}}$ (радиус сферы, выжженной в топливе) выражают закон теплообмена между частицей и топливом. При этом тепловые потоки, отводимые в топливо, будут по координате θ переменными, т.е. нагрев топлива будет несимметричным ввиду начальной неоднородности температурного поля поверхностного слоя заряда.

Для определения предельных характеристик воспламенения, связанных с использованием частиц малых размеров, полагаем температурное поле топлива на глубине, равной радиусу частицы, условно однородным со средней температурой, равной температуре поверхности топлива T_S.

При этом процесс теплообмена частицы с топливом становится симметричным, и уравнение теплопроводности топлива в окрестностях частицы в сферических координатах можно представить в виде:

$$\frac{\partial T_{\text{т}}}{\partial t} = a_{\text{т}}\left(\frac{\partial^2 T_{\text{т}}}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right).$$

Если пренебречь газовой прослойкой, то в этом случае граничные условия 3-го рода переходят в граничные условия 4-го рода, т.е.

$$T_{\text{ч}} = T_{\text{т}};\ \ -\lambda_{\text{ч}}\left(\frac{\partial T_{\text{ч}}}{\partial r}\right) = -\lambda_{\text{т}}\left(\frac{\partial T_{\text{т}}}{\partial r}\right).$$

Предельное условие локального воспламенения топлива твердой частицей включает два требования:

– температура контактной поверхности $T_{\text{П}}$ должна достичь уровня, соответствующего началу крутого участка кривой Аррениуса;

– при этом уровне должен продолжаться прогрев глубинных слоев топлива: необходимо, чтобы $\frac{\partial T_{\text{т}}}{\partial t} > 0$.

Рассматривая предельное условие воспламенения, можно пренебречь тепловыделением при газификации топлива на контактной поверхности, составляющей малую долю от тепла, поставляемого частицей.

На рис. 2. представлены графики изменения температуры поверхности топлива при осаждении на нее частиц радиусами 0,00005, 0,000075 и 0,0001 м. Как видно из графиков, при температуре воспламенения топлива 500…560 К очаги образуют частицы радиусом 0,00005 м, при большей температуре воспламенения топлива размеры частиц, способных образовывать очаги, будут выше.

На рис. 3 представлены температурные профили частицы и топлива в момент воспламенения (температура воспламенения поверхности топлива составляет 600 К, радиус частицы 0,000075 м). Кроме того, приведены промежуточные профили температур. Как видно из графика, температура частицы на поверхности падает примерно на 150 К, что составляет 11,5 %.

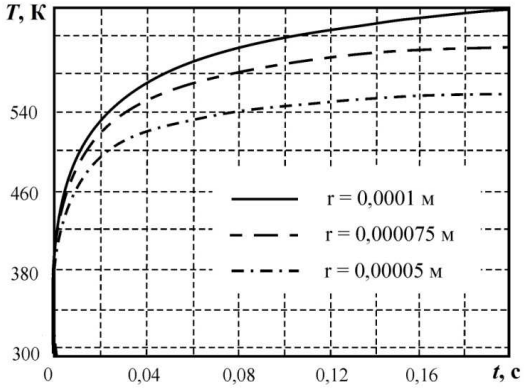


Рис. 2. Зависимость температуры поверхности топлива в зоне контакта

Зависимость времени воспламенения от радиуса частицы имеет гиперболический характер (рис. 4). Видно, что при неограниченном увеличении радиуса частицы время воспламенения поверхности топлива не меняется. Это вызвано значительным увеличением площади контакта.

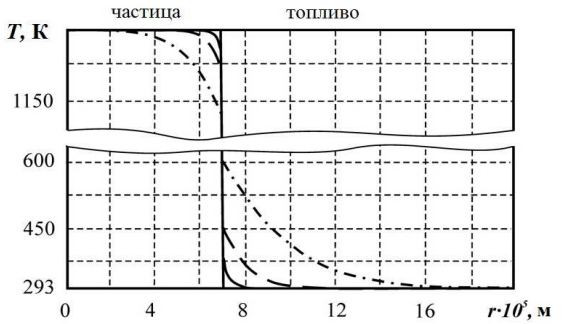


Рис. 3. Профили температур частицы и топлива

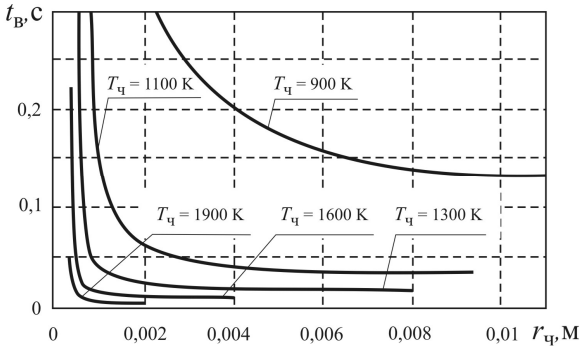


Рис. 4. Зависимости времени воспламенения от радиуса частиц

Рассматривая предельное условие воспламенения, для определения минимального радиуса частицы, способной обеспечить очаг воспламенения, можно использовать следующее выражение [6]:

$$r_{\text{пр}} = 2\frac{k_{\text{т}}}{\alpha}\frac{\left(T_{\text{п}} - T_s\right)}{\left(T_{\text{ч}} - T_{\text{п}}\right)},$$

а для определения общего числа подобных частиц, приходящихся на единицу площади в единицу времени, можно воспользоваться зависимостью

$$n_{\text{в}} = \dot{m} \int_{r_{\text{пр}}}^{r_{\max}} \varphi(r) dr ,$$

где $\dot{m}$ – удельный поток массы твердых частиц к поверхности; $\varphi(r)$ – функция распределения, представляющая количество частиц с размером $r - dr$ на единицу массы конденсированной фазы; $r_{\max}$ – максимальный радиус частиц.

После контактного воспламенения топлива радиус поверхности газификации начинает расти, и влияние частицы как теплового источника резко убывает. Разгар топлива в окрестности частицы будет неравномерным в силу неравномерности температурного поля топлива. С течением времени по мере приближения глубины прогара к толщине слоя, прогретого внешним тепловым потоком (фронтальный прогрев), неравномерность разгара будет усиливаться. При этом процесс распространения пламени по поверхности будет все меньше зависеть от начальной геометрии очага и все в большей степени определяться температурой нагретой поверхности топлива.

На рис. 5 представлена область значений температур и радиусов частиц, способных образовывать очаги воспламенения (температура воспламенения поверхности топлива 520 К).

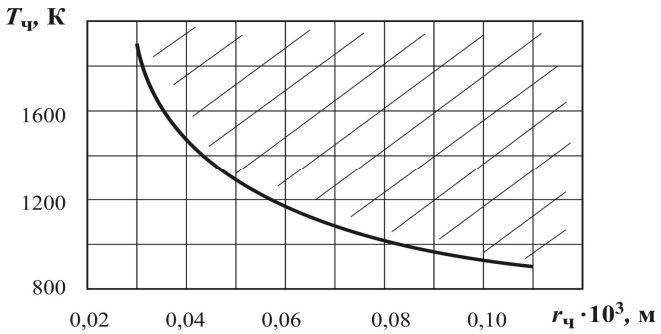


Рис. 5. Область значений параметров частиц, способных образовывать очаги воспламенения

Задаваясь функцией распределения частиц по поверхности, можно получить график зависимости относительной поверхности горения от времени (рис. 6).

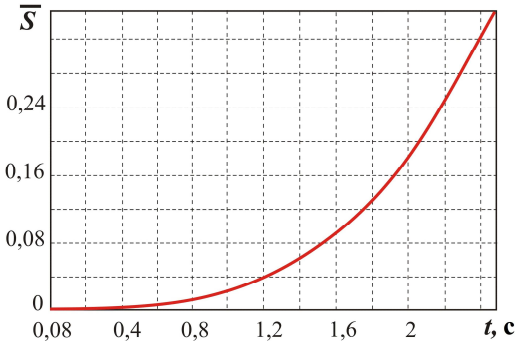


Рис. 6. Зависимость относительной поверхности горения от времени

Представленная кривая показывает характер распространения относительной поверхности горения во времени. Для получения реальной кривой необходимо задавать функцию распределения и, как обязательное условие, рассматривать процесс нестационарного нагрева топлива как инертного вещества при заданном локальном значении теплового потока из газовой фазы.

Список литературы

1. Арсентьева М.В., Дунаев В.А. Моделирование нестационарных газодинамических процессов с учетом двухфазного потока // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2007. Вып. 3. С. 183-187.

2. Дунаев В. А., Каширкин А. А., Арсентьева М. В. Численная модель движения гетерогенных сред в воспламенительный период в камере РДТТ // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы, № 4, 2008. С.48-50.

3. Зайчик Л. И., Першуков В. А. Проблемы моделирования газодисперсных турбулентных течений с горением или фазовыми переходами (обзор) // Изв. РАН. МЖГ, 1996, № 5. С. 60-65.

4. Арсентьева М.В. Особенности моделирования двухфазных турбулентных течений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2012. Вып. 11. Ч. 1. С. 48-53.

5. Арсентьева М.В., Дунаев В.А., Никитин В.А., Щербаков С.Н. Оценка воспламенительной способности конденсированных частиц, образующихся при горении дымного пороха // Известия Тульского государственного университета. Проблемы специального машиностроения, 2003. Вып.6. Ч. 1. С. 116-118.

6. Волков Е.Б., Сырицын Т.А., Мазинг Г.Ю. Статика и динамика ракетных двигательных установок. М.: Машиностроение, 1978. Т. 2. 320 с.

7. Внутрибаллистические процессы в ствольных и ракетных двигателях: в 3 ч. Ч. 1 / М.В. Арсентьева, М.С. Воротилин, Н.В. Могильников, В.Ю. Сладков, О.А. Фомичева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 283 с.

8. Внутрибаллистические процессы в ствольных и ракетных двигателях: в 3 ч. Ч. 2 / М.В. Арсентьева, М.С. Воротилин, Н.В. Могильников, В.Ю. Сладков, О.А. Фомичева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2020. 217 с.

Арсентьева Марина Владимировна, канд. техн. наук, доцент, mars_100@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

INVESTIGATION OF THE FLAMMABILITY OF CONDENSED PARTICLES

M.V. Arsentieva

The issues of focal ignition of the fuel surface by a condensed particle are considered. The results of numerical simulation of the fuel heating process are presented. The range of parameters of particles capable of forming ignition centers is obtained.

Key words: modeling, internal ballistics, ignition.

Arsentieva Marina Vladimirovna, candidate of technical sciences, docent, mars_100@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 539.374

ПРОДОЛЬНЫЕ ВОЛНЫ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В МОНОБЛОЧНЫХ СТВОЛАХ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ СИСТЕМ ПРИ ВЫСТРЕЛЕ

В.Л. Баранов, Н.П. Смирнов, Р.А. Тер-Данилов

Получена полная система квазилинейных дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа, описывающая распространение продольных волн растягивающих напряжений в стволах артиллерийских систем, свойства материалов которых моделируются конституционными уравнениями Малверна-Соколовского-Кристеску, для случаев непрерывной негладкой неоднородности геометрических характеристик поперечных сечений по длине. Сформулирована краевая задача Гурса, соответствующая условиям нагружения стволов давлением пороховых газов при выстреле. Анализируется влияние геометрической неоднородности на неоднородность и на нестационарность параметров напряженно-деформированного состояния.

Ключевые слова: свойства материалов, геометрическая неоднородность, напряженно-деформированное состояние.

Опыт эксплуатации стволов артиллерийских и стрелковых систем на стадии их отработки и при проведении полигонных испытаний показывает, что при попытках уменьшить время достижения максимального давления пороховых газов в зарядной каморе и увеличить амплитудные значения давления наблюдаются ситуации, когда возникают продольные неупругие деформации и поперечная деструкция материала ствола в зоне дульного отверстия. Ниже проведено физическое и математическое моделирование этого недопустимого явления с позиций механики деформируемого твердого тела.

Ствол моделируется прямолинейным стержнем конечной длины L, свойства материала которого описываются хорошо известными и широко апробированными для случаев ударного и динамического внешнего нагружения конституционными уравнениями Малверна-Соколовского-Кристеску вида [1]:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{1}{E}\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \left[\frac{\sigma - f(\varepsilon)}{\beta(\varepsilon)}\right]^{\alpha(\varepsilon)}, \qquad (1)$$

где $f(\varepsilon)$ - диаграмма квазистатического нагружения материала; $\alpha(\varepsilon)$, $\beta(\varepsilon)$ - аппроксимирующие функции, характеризующие его вязкопластические свойства; E - модуль упругости материала.

В момент времени $t = 0$ к торцу стержня прикладывается импульс растягивающих напряжений, аппроксимирующий изменение давления пороховых газов в канале ствола при выстреле [2]:

$$\sigma_z(0,t) = a(t + t_*)^b \exp(c(t + t_*)), \qquad (2)$$

где a, b, c, t_* - константы, определяемые обработкой экспериментальных кривых изменения давления методом наименьших квадратов.

Начальные условия задачи соответствуют первоначально ненапряженному, недеформированному и неподвижному материалу:

$$\sigma_z(z,0) = \varepsilon_z(z,0) = V_z(z,0) = 0, \qquad (3)$$

где z - лагранжева координата, совпадающая с продольной осью стержня с началом в точке приложения внешнего импульса давления.

Стержень является полым, имеет круговое поперечное сечение, образующие наружной поверхности описываются заданными непрерывными негладкими функциями $y = y_1(z)$ и $y = y_1(z)$ соответственно.

Полная система уравнений, описывающая распространение продольных волн растягивающих или сжимающих напряжений в стержне в самом общем случае, соответствующем упруго-вязкопластической модели материала и геометрической неоднородности стержня, включает в себя уравнения движения материала, уравнение совместности деформаций (или уравнение неразрывности) и конституционное уравнение (1) и является квазилинейной системой трех дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка:

$$\rho\left[y_1^2(z)-y_2^2(z)\right]\frac{\partial V(z,t)}{\partial t}=$$
$$=\pm 2\left[y_1(z)\frac{dy_1(z)}{dz}-y_2(z)\frac{dy_2(z)}{dz}\right]\sigma(z,t)\pm\frac{\partial\sigma(z,t)}{\partial z}\left[y_1^2(z)-y_2^2(z)\right]; \quad (4)$$
$$\frac{\partial\varepsilon(z,t)}{\partial t}=\frac{\partial V(z,t)}{\partial z};\ \frac{\partial\varepsilon(z,t)}{\partial t}-\frac{1}{E}\frac{\partial\sigma(z,t)}{\partial t}=\Phi(\sigma,\varepsilon),$$

где $\Phi(\sigma,\varepsilon)$- условное обозначение правой части конституционного уравнения (1), знак (+) в правой части уравнения движения соответствует волне растягивающих напряжений, знак (-) – случаю напряжений сжатия. В дальнейшем будет анализироваться первый случай.

Если положить в системе (4) материал стержня линейно упругим, то есть обнулить правую часть уравнения (1) и, соответственно, – последнего уравнения системы (4), и рассматривать стержень геометрически однородным, то есть считать $y(z)=const$, то система уравнений (4) вырождается в классическую линейную систему волновых уравнений, имеющую аналитическое решение в форме Даламбера [3]. При этом изменение каждого параметра напряженно-деформированного и кинематического состояний материала стержня во времени в различных поперечных сечениях будут описываться функциями, не зависящими от лагранжевой координаты z .

Рассмотрим менее частный по отношению к предыдущему вариант формулировки волновой задачи, имеющий важное практическое приложение: пусть параметры начальных условий и геометрия нагружаемого торца стержня таковы, что на торце формируется волна упругих напряжений, которая распространяется в геометрически неоднородный стержень. При этом упругое состояние материала ограничено сверху, то есть существуют некоторое предельное напряжение или, в общем случае, некоторое формализованное условие, при превышении или невыполнении которых материал переходит в упруго-вязкопластическое состояние, соответствующее конституционному уравнению (1), а при выполнении некоторых дополнительных условий – разрушается. Наиболее приемлемые и апробированные для широкой группы металлов варианты записи уравнений предельного состояния приведены в работе [4].

В этом случае общая система уравнений (4) принимает вновь квазилинейный вид:

$$\rho\left[y_1^2(z)-y_2^2(z)\right]\frac{\partial V(z,t)}{\partial t}=2\left[y_1(z)\frac{dy_1(z)}{dz}-y_2(z)\frac{dy_2(z)}{dz}\right]\sigma(z,t)+\frac{\partial\sigma(z,t)}{\partial z}\left[y_1^2(z)-y_2^2(z)\right];$$
$$\frac{\partial\varepsilon(z,t)}{\partial t}=\frac{\partial V(z,t)}{\partial z};\ \frac{\partial\varepsilon(z,t)}{\partial t}-\frac{1}{E}\frac{\partial\sigma(z,t)}{\partial t}=0 \quad (5)$$

но в процессе ее решения необходимо непрерывно, на каждом шаге численного интегрирования, отслеживать изменение значений напряжений и деформаций в материале и производить сравнение их с критерием предельного состояния, соответствующим выходу материала из зоны упругости. И физической причиной этого перехода в такой постановке задачи будет являться геометрическая неоднородность стержня, что отражает первое слагаемое в правой части уравнения движения. Такая постановка волновой задачи, как показал проведенный анализ, является новой.

Следуя [5], определим, к какому типу дифференциальных уравнений в частных производных относится система (4). Для этого дополним ее тремя соотношениями для полных дифференциалов искомых функций $\partial\sigma(z,t)$, $\varepsilon(z,t)$, $V(z,t)$, в результате чего получим систему шести уравнений, которая по отношению к шести первым частным производным искомых функций будет являться линейной алгебраической. Потребуем ее неопределенности, которая впоследствии позволит найти искомые решения, удовлетворяющие начальным и граничному условиям. Неопределенность линейной алгебраической системы уравнений реализуется, когда ее главный и любой неглавный определители тождественно равны нулю.

Равенство нулю главного определителя системы позволяет получить в дифференциальной форме уравнения характеристических направлений системы (5) в плоскости независимых переменных $z - t$:

$$\left[y_1^2(z) - y_2^2(z)\right]dz\left(dz^2 - \frac{E}{\rho}dt^2\right) = 0,$$

откуда

$$dz_1 = 0, \quad dz_{2,3} = \pm\sqrt{\frac{E}{\rho}}dt, \tag{6}$$

где $c = \sqrt{E/\rho}$ - скорость распространения продольной волны упругих напряжений в материале стержня.

Таким образом, система уравнений (4) имеет три действительные характеристики, то есть по-прежнему, как и классическая система волновых уравнений, упоминавшаяся выше, является системой гиперболического типа.Следовательно, геометрическая неоднородность стержня не влияет на тип соответствующей ей системы уравнений, что является, как будет показано в дальнейшем, важным практическим обстоятельством.

Приравнивая любой из шести неглавных определителей системы нулю и подставляя последовательно в полученное уравнение дифференциальные уравнения характеристик (6), получаем рабочие уравнения, устанавливающие связь между полными дифференциалами искомых функций вдоль соответствующих характеристических направлений:

- вдоль характеристического направления $dz = 0$:

$$d\varepsilon(z,t) - \frac{1}{E}d\sigma(z,t) = \Phi(\sigma,\varepsilon), \tag{7}$$

- вдоль характеристических направлений $dz = \pm cdt$:

$$\begin{aligned}&\sqrt{\frac{\rho}{E}}[y_1^2(z) - y_2^2(z)]dV(z,t) \mp \frac{[y_1^2(z) - y_2^2(z)]}{E}d\sigma(z,t) = \\ &\pm[y_1^2(z) - y_2^2(z)]\Phi(\sigma,\varepsilon)dt + \frac{2}{\sqrt{E\rho}}\left[y_1(z)\frac{dy_1(z)}{dz} - y_2(z)\frac{dy_2(z)}{dz}\right]\sigma(z,t)dt\end{aligned} \tag{8}$$

Теперь интегрирование квазилинейных гиперболических систем дифференциальных уравнений в частных производных (4), (5) можно заменить с точностью до линейного преобразования интегрированием систем обыкновенных дифференциальных уравнений (7) - (8), записанных вдоль прямолинейных характеристических направлений (6). Причем, для последней системы с помощью начальных (2) и граничных (3) условий сформулирована краевая задача Гурса [5]. Для ее численного решения разработан программный комплекс [6].

В случае выхода параметров волны в процессе распространения по стержню за пределы упругого состояния материала системы уравнений (5) и (7) - (8) видоизменяются, так как в правой части конституционного уравнения появляется функция $\Phi(\sigma,\varepsilon)$,

описывающая вязкопластические свойства материала. Комплекс [6] позволяет решать и эту задачу. При этом возможны качественно различные исходы волнового нагружения стержня:

- в случае хрупкого характера разрушения материала, что с учетом его скоростного охрупчивания в волне наиболее вероятно, разрушение материала происходит вследствие уменьшения поперечных габаритов стержня и, как следствие – увеличения амплитудных значений параметров напряженно-деформированного состояния, в зоне упругого состояния материала;

- если параметры напряженно-деформированного состояния материала изменяются на участке упругого состояния таким образом, что не выводят его за пределы критерия разрушения, и упругая волна трансформируется в упруго-вязкопластическую, то разрушение материала возможно в зоне его неупругого волнового деформирования.

Таким образом, в данной работе сформулирована и доведена до уровня возможности ее практической реализации, с помощью вновь созданного авторского программного комплекса актуальная задача оценки, в том числе и деструктивных последствий волнового нагружения стержней из упругих и упруго-вязкопластических материалов с геометрической неоднородностью, моделирующих ударное нагружение стволов артиллерийских и стрелковых систем при выстреле.

Список литературы

1. Баранов В.Л., Кудряшов М.А., Руденко В.Л., Смирнов Н.П., Чванов А.Е., Щекин А.В., Щитов В.Н. Некоторые вопросы проектирования и отработки пуль патронов стрелкового оружия. Тула: ТулГУ, 2015. 192 с.

2. Баранов В.Л., Руденко В.Л. Проблема численной неустойчивости при аппроксимации кривых изменения давления в канале ствола при выстреле методом наименьших квадратов // Известия Тульского государственного университета. Проблемы специального машиностроения. 2004. Вып. 7 (часть 1). С. 27-32.

3. Новацкий В. Волновые задачи теории пластичности. М.: Мир, 1978. 312 с.

4. Баранов В.Л., Дунаева И.В., Литус И.Б., Руденко В.Л., Очнев Д.А., Сорокатый А.В., Чванов А.Е. Поведение стержневых и оболочечных конструкций из упруговязкопластических материалов в условиях высокоскоростного импульсного нагружения. Н. Тагил: НТИИМ. Тула: ТулГУ, 2013. 323 с.

5. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. М: Физматгиз, 1960. Т. 2. 620 с.

6. Баранов В.Л., Смирнов Н.П., Левин А.С., Тер-Данилов Р.А. Программа расчета параметров напряженно-деформированного состояния ударно-нагруженных неоднородных стержней из упруго-вязкопластических материалов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (РФ) № 201966295 от 07.10.2019 г.

Баранов Виктор Леопольдович, д-р техн. наук, профессор, ivts-spv1411@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Смирнов Николай Павлович, инженер, генеральный директор, web@ntiim.ru, Россия, Н. Тагил, ФКП «Нижнетагильский институт испытания металлов»,

Тер-Данилов Роман Арустамович, канд. техн. наук, доцент, ivts-spv1411@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

LONGITUDINAL WAVES OF TENSILE STRESSES IN MONOBLOCK BARRELS OF ARTILLERY SYSTEMS WHEN FIRED

V.L. Baranov, N.P. Smirnov, R.A. Ter-Danilov

A complete system of quasilinear partial differential equations of hyperbolic type describing the propagation of longitudinal waves of tensile stresses in the barrels of artillery systems whose material properties are modeled by the Malvern-Sokolovsky-Christescu constitutional equations is obtained for cases of continuous non-smooth inhomogeneity of the geometric characteristics of cross-sections along the length. The Gurs boundary value problem is formed, which corresponds to the conditions of loading the barrels with the pressure of powder gases during firing. The influence of geometric inhomogeneities and on non-stationary parameters of the stress-strain state is analyzed.

Key words: material properties, geometric inhomogeneity, stress-strain state.

Baranov Viktor Leopoldovich, doctor of technical sciences, professor, ivts-spv1411@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Smirnov Nicolay Pavlovich, general director (CEO), web@ntiim.ru, Russia, Nizhny Tagil, Metal Test Institute,

Ter-Danilov Roman Arustamovich, candidate of technical sciences, docent, ivts-spv1411@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 539.3; 624.058.8

ДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АМОРТИЗАТОРОВ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ ДЛЯ СЛЕДЯЩЕЙ НЕСКОЛЬЗЯЩЕЙ СХЕМЫ ВНЕШНЕГО НАГРУЖЕНИЯ

В.Л. Баранов, А.С. Левин

Анализируется кинетика изменения кинематических и энергетических характеристик геометрически неоднородных стержневых упругих элементов амортизаторов для наиболее общей нескользящей следящей схемы приложения внешней нагрузки в случае их больших прогибов. Решение строится в динамической постановке с учетом затрат энергии тормозящейся массы на кинетическую энергии массы упругого элемента в процессе его нестационарного и неоднородного деформирования. Показано, что учет динамики оказывает существенное влияние на параметры функционирования амортизаторов. Разработан и реализован на практике программный комплекс, позволяющий получать решение путем целенаправленного перебора вспомогательных задач Коши с параллельной оценкой его точности.

Ключевые слова: стрелковое оружие, амортизатор, поперечный изгиб, силовая характеристика, краевая задача, оптимизация.

Проведенный анализ конструкций узлов амортизации стрелково-пушечного оружия показывает, что встречаются такие конструктивные решения, в которых деформации упругих элементов амортизаторов по величине соизмеримы с их габаритными размерами [1]. Важнейшей эксплуатационной характеристикой амортизаторов являются их силовые характеристики, то есть зависимости амплитуд перемещений упругих элементов от деформирующих элементы сосредоточенных усилий от в точках их приложения, так как они характеризуют потери кинетической энергии подвижной амортизируемой массы оружия, то есть эффект амортизации. В случае использования амортизаторов в виде геометрически неоднородных консольно защемленных упругих балок их силовые характеристики, определяющие частичную потерю кинетической энергии массы подвижного звена в цикле нагружения, в случае больших прогибов су-

щественно нелинейны [2, 3]. Причем, конкретный вид силовой характеристики зависит от совокупности геометрических особенностей упругого элемента, механических характеристик его материала и от характера приложения внешней сосредоточенной силы.

На практике встречаются различные варианты приложения сосредоточенной силы для случаев больших прогибов консольного упругого элемента амортизатора. Их совместный анализ показывает, что наиболее общим случаем является нескользящая следящая схема, изображенная на рис.1.

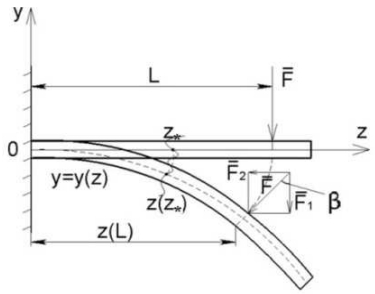


Рис. 1. Нескользящая следящая схема приложения сосредоточенной силы для случаев больших прогибов консольного упругого элемента амортизатора

Квазистатическая постановка данной задачи была реализована в работе [4]. Переход к динамической модели связан с учётом значительно большего числа физических факторов, усложняющих процесс решения, но при этом он позволяет определять не только амплитудные значения перемещений материальных точек упругого элемента, но и отслеживать их развитие и изменение в реальном времени, что является, безусловно, важным обстоятельством при проектировании скорострельного стрелково-пушечного вооружения. Основным дополнительным фактором, влияющим на кинематику перемещения упругого элемента амортизатора в динамической постановке, является учет в энергобалансе анализируемой механической системы кинетического компонента энергии, расходуемой на движение массы упругого элемента в процессе торможения подвижных частей оружия.

В квазистатической постановке закон сохранения энергии имел вид:

$$\frac{mv_0^2}{2} = \frac{mv_1^2}{2} + E_a \ , \tag{1}$$

где m - масса тормозящегося тела; v_0 - скорость тормозящегося тела в момент его соприкосновения с упругим элементом амортизатора; v_1 - скорость тормозящегося тела в текущий момент времени в цикле нагружения; E_a - потенциальная энергия упругого деформирования, накопленная амортизирующим элементом к рассматриваемому моменту времени.

В динамической постановке закон сохранения энергии (1) видоизменяется:

$$\frac{mv_0^2}{2} = \frac{mv_1^2}{2} + E_a + E_{к.а} \ , \tag{2}$$

где $E_{к.а}$ - текущая величина кинетической энергии движущейся массы амортизирующего устройства:

$$E_{к.а} = \int_0^{M(L)} \frac{v^2(z)}{2} dM = \frac{\rho}{2} \int_0^L S(z_*) \cdot v^2(z_*) dz_* \ , \tag{3}$$

где $v(z_*)$ - мгновенная скорость точки амортизирующего устройства с координатой z_*; $S(z_*)$ - площадь поперечного сечения упругого элемента амортизатора с координатой z_* (в рамках рассматриваемой прямой задачи прочностного проектирования по-

следняя функция задана априори); ρ - плотность материала упругого элемента; L - длина упругого элемента в точке приложения внешнего контактного усилия (рис. 1). Так как силовая характеристика амортизирующего элемента зависит только от перемещения крайней точки элемента, то полное перемещение подвижного тела при решении задачи как в квазистатической, так и в динамической постановках, должны быть одинаковыми, то есть они инвариантны.

Выразим скорость произвольной точки упругого элемента в определённый фиксированный момент времени $T = const$ через скорость точки приложения внешней силы.

$$\frac{v(z_*,T)}{v(L,T)}=\frac{\dot{r}(z_*,T)}{\dot{r}(L,T)}\ ,\ \frac{dr(z_*,t)}{dt}\cdot\frac{dt}{dr(L,t)}=\frac{dr(z_*,t)}{dr(L,t)}\ ,\ \frac{v(z_*,T)}{v(L,T)}=\frac{dr(z_*,t)}{dr(L,t)_{(t=T)}}\ , \qquad (4)$$

где $r(z_*,t)$ и $r(L,t)$ - перемещения точек с координатами z_* и L соответственно.

Следовательно, если известны перемещения точек упругого элемента с координатами z_* и L , то возможно можно определить отношение их скоростей в рассматриваемый момент времени. Перемещения точек упругого элемента $r(z_*,t)$ и $r(L,t)$ с определялись путем последовательного решения задач Коши для дифференциальных уравнений упругой линии. Вводя обозначение: $K_r(z_*)=\frac{dr(z_*,t)}{dr(L,t)_{(t=T)}}$, записываем уравнение (3) в конечной рабочей форме :

$$E_{к.а}=\frac{\rho}{2}\cdot v^2(L,T)\cdot\int_0^L S(z_*)K_r^2(z_*,T)dz_*\ . \qquad (5)$$

Теперь разрешаем уравнения (1) и (2) относительно $v(L,T)$:

$$v(L,T)=\sqrt{\frac{mv_0^2-2\cdot E_a(T)}{m+\rho\cdot\int_0^L S(z_*)K_r^2(z_*,T)dz_*}}\ ,\qquad v(L,T)=\sqrt{\frac{\frac{mv_0^2}{2}-E_a(T)}{\frac{m}{2}}}=\sqrt{\frac{mv_0^2-2\cdot E_a(T)}{m}}\ . \qquad (6)$$

Время Т находится из следующего соотношения:

$$T=\int_0^{r(T)}\frac{dr(t)}{v(L,r)}\ . \qquad (7)$$

Таким образом, сформулированная выше задача сводится к организованному перебору начальных численных значений параметров *Z, Y, C* в области их допустимых значений и к многократному решению соответствующих им вспомогательных задач Коши. Как показал проведенный анализ, последовательный перебор всех значений параметров даже на современных компьютерах занимает большое время, поэтому далее воспользуемся алгоритмом нелинейного программирования с использованием в нем метода внутренней точки (или барьерного метода), которые в настоящее время достаточно хорошо развиты и являются наиболее машинно-ориентированными [5].

Осуществлялась минимизация следующей целевой функции:

$$f(Z,Y,C)=\frac{|L-z_*(Z)|+|Y-y(Z)|}{L}+|C-y'(Z)|\ , \qquad (8)$$

где *Z* – абсцисса свободного конца упругого элемента; *Y* – стрела прогиба нейтрального слоя изогнутого упругого элемента в точке приложения внешней сосредоточенной силы; *C* - первая производная функции $y=y(z)$ в точке $z_*=L$; *y(Z)* и $z_*(Z)$ и $y'(Z)$ - текущие значения величин прогиба упругого элемента амортизатора, абсциссы и первой производной функции *y(z)* в точке приложения внешней силы *z = Z* после реше-

ния соответствующей задачи Коши с выбранными значениями величин Z, Y, C. Для решения данного класса задач был разработан, апробирован и зарегистрирован авторский программный комплекс [6], позволяющий строить решение численными методами с использованием средств языка программирования Matlab. На вход программы подается варьируемая с определённым шагом внешняя нагрузка F, и получаем прогибы любой точки упругого элемента и соответствующие им перемещения $r(z_*,t)$ и $r(L,t)$.

Таким образом, полученные соотношения позволяют проводить анализ процесса деформирования упругого элемента амортизатора в реальном времени и, в конечном итоге, получить ответ на важный для проектирования амортизаторов стрелково-пушечного вооружения вопрос определения времени полного замедления упругого элемента амортизатора и, как следствие, времени полного останова подвижных частей системы, а также произвести количественную оценку влияния учета на него динамики процесса.

Ниже приводятся некоторые результаты проведенных численных расчетов и их анализ (рис. 2 - 4). На всех рис. штриховые линии графиков соответствуют решению задачи в квазистатической, сплошные - в динамической постановках. Расчеты проводились для следующих исходных данных. Материал упругого элемента амортизатора - пружинная сталь 60С2А. Плотность материала $\rho = 7{,}68 \cdot 10^3$ кг/м^3; модуль упругости $E = 212 \cdot 10^9$ Па. Поперечное сечение упругого элемента - прямоугольник с постоянным основанием $b = 0{,}02$ м. Верхняя и нижняя образующие поперечного сечения изменяются по линейным законам $y_{1,2} = A_{1,2}\, z + B_{1,2}$, $A_1 = -\,0{,}002$, $B_1 = 0{,}005$ м, $A_2 = +\,0{,}002$, $B_2 = -\,0{,}005$ м. Суммарная масса упругого элемента $M = 0{,}439$ кг, масса ударяющего тела $m = 0{,}1$кг, начальная скорость его контакта с упругим элементом амортизатора $V_0 = 101$ м/с.

На рис. 2, 3 представлены графики изменения скоростей подвижных частей и точки контакта упругого элемента амортизатора (рис. 2) и кинетической энергии тормозящегося тела (рис. 3) во времени.

Видно, что учет вовлечения массы упругого элемента в совместное движение системы на этапе ее торможения увеличивает время полного торможения подвижной массы на 35-40 %. При этом перемещения подвижной массы до ее полной остановки (площади под кривыми на рис. 2) в обоих случаях одинаковы, что подтверждает сделанные выше априорные прогнозы. Рис. 4 иллюстрирует изменение кинетической энергии подвижной массы во времени.

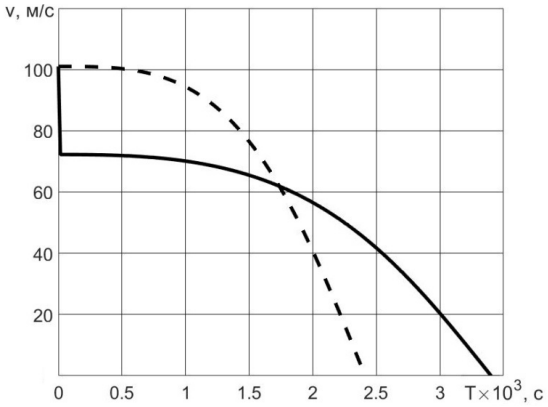


Рис. 2. Изменение скорости точки контакта подвижной массы и упругого элемента амортизатора во времени в квазистатической и динамической постановках задачи

Разрывы первого рода на начальных участках графиков, соответствующих динамическому варианту решения задачи, имеют физическое объяснение: динамическая постановка задачи предполагает мгновенное вовлечение в движение с переменными

скоростями всей массы упругого элемента. В реальных условиях это вовлечение массы в движение происходит не мгновенно, а с конечной скоростью распространения изгибной поперечной волны в материале элемента, которая является его физической константой. Учет этого обстоятельства и введение его в модель процесса, на наш взгляд, - перспективное направление дальнейшего развития исследований.

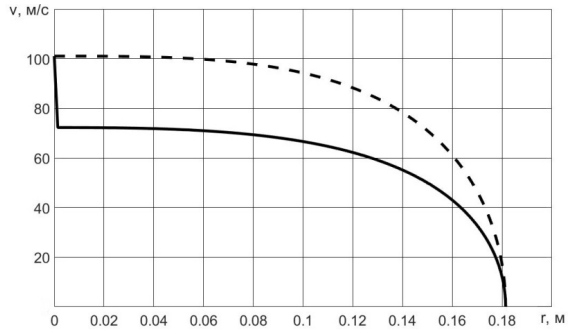


Рис. 3. Изменение скорости точки контакта подвижной массы и упругого элемента в функции изгибного перемещения в квазистатической и динамической постановках задачи

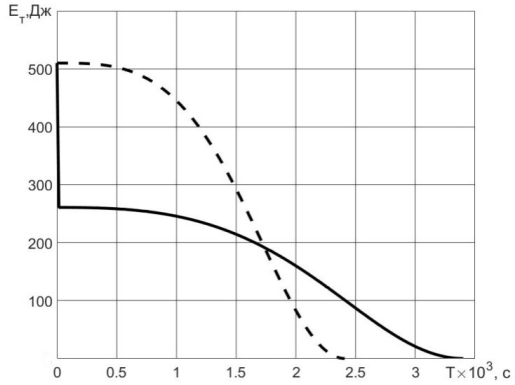


Рис. 4. Изменение кинетической энергии подвижной массы во времени в квазистатической и динамической постановках задачи

Таким образом, показано, что учет динамичности процесса деформирования упругого элемента амортизатора в энергобалансе системы, предложенный и реализованный выше, оказывает существенное влияние на кинематику процесса.

Список литературы

1. Физические основы устройства и функционирования стрелково-пушечного, артиллерийского и ракетного оружия / Учебник МО РФ. Авт.: Баранов В.Л., Власов В.А. и др. – Волгоград: «Политехник», 2002. 559 с.

2. Попов Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней. М.: Наука, 1986. 296 с.

3. Светлицкий В.А. Механика стержней / Учебник для ВТУЗов. В 2-х частях. Часть 1. М.: Высшая школа, 1987. 320 с.

4. Byrd R.H., Gilbert J. C., Nocedal J. A Trust Region Method Based on Interior Point Techniques for Nonlinear Programming // Mathematical Programming. 2000. Vol. 89. № 1. P. 149–185.

5. Баранов В.Л., Левин А.С. Силовые характеристики упругих элементов амортизаторов стрелкового оружия для нескользящей следящей схемы внешнего нагружения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. Вып. 11. С. 124 - 130.

6. Баранов В.Л., Левин А.С., Тер-Данилов Р.А. Программа расчета характеристик упругих элементов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (РФ) № 2019616355 от 06 мая 2019.

Баранов Виктор Леопольдович, д-р техн. наук, профессор, ivts-spv1411@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Левин Артем Сергеевич, аспирант, ivts-spv1411@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DYNAMIC DEFORMATION OF SHOCK ABSORBER ROD ELEMENTS IN SMALL ARMS FOR TRACKING NON-SLIP EXTERNAL LOADING SCHEME

V.L. Baranov, A.S. Levin

The kinetics of changes in the kinematic and energy characteristics of geometrically inhomogeneous rod elastic elements of shock absorbers is analyzed for the most general non-slip tracking scheme for applying an external load in the case of their large deflections. The solution is constructed in a dynamic formulation taking into account the energy consumption of the decelerating mass for the kinetic energy of the mass of an elastic element in the process of its unsteady and inhomogeneous deformation. It is shown that taking into account the dynamics has a significant impact on the parameters of the functioning of shock absorbers. A software package has been developed and implemented in practice, which makes it possible to obtain a solution by purposeful enumeration of auxiliary Cauchy problems with a parallel estimation of its accuracy.

Key words: small arms, shock absorber, transverse bending, force characteristic, boundary value problem, optimization.

Baranov Viktor Leopoldovich, doctor of technical sciences, professor, ivts-spv1411@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Levin Artem Sergeevich, postgraduate, ivts-spv1411@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 539.4; 624.058.8

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ЛОПАСТИ СВЕРТЫВАЮЩЕГОСЯ ОПЕРЕНИЯ РСЗО В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ ИНЕРЦИИ

В.Л. Баранов, М.С. Воротилин, А.А. Соловьев, Б.О. Чибирев

Получено обобщенное решение прямой задачи прочностного проектирования консольно-закрепленных криволинейных лопастей и узлов крепления и фиксации свертывающегося оперения РСЗО в поле центробежных сил инерции на этапе перехода от активного к пассивному участкам траектории.

Ключевые слова: лопасть оперения, узел закрепления, центробежные силы инерции, интегральные изгибающие моменты и поперечные силы, параметры напряженного состояния, прочность.

Анализируется напряженное состояние материала лопастей свертывающегося оперения вращающихся реактивных снарядов РСЗО на выходе из активного участка траектории в поле центробежных сил инерции [1]. Геометрия поперечного сечения снаряда и принятые обозначения приведены на рис. 1.

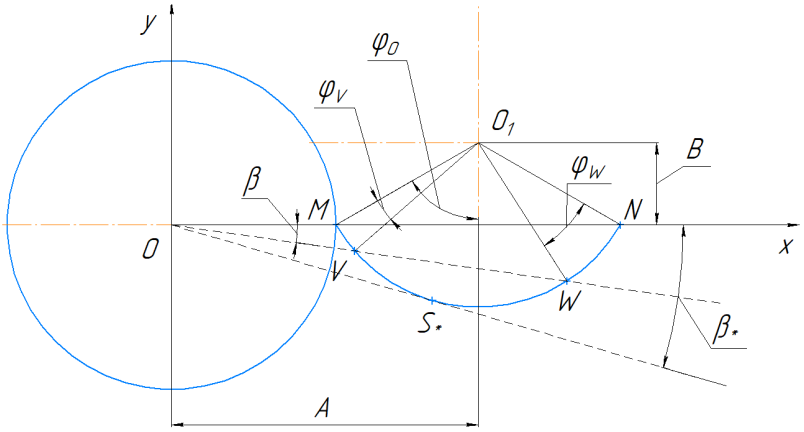


Рис. 1. Поперечное сечение анализируемого узла и принятые обозначения

Пусть k_* -количество лопастей оперения. Тогда:

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{k_*};\ A = (1+\sin\frac{\pi}{k_*})\cdot R;\ B=R\cdot\cos\frac{\pi}{k_*}. \tag{1}$$

Решение проводится в декартовой системе координат, начало которой совмещено с осью симметрии корпуса снаряда, а ось абсцисс проходит через точку M закрепления лопасти оперения на корпусе, а также в плоской полярной системе координат, связанной с геометрией свертывающейся лопасти. Из рис. следует, что координаты x_V, y_V, x_W, y_W произвольных точек V и W пересечения лопасти с лучом с угловой координатой и их угловые координаты φ_V, φ_W в полярной системе координат определяются по формулам:

$$x_V(\beta) = \frac{(A+B\cdot\mathrm{tg}\beta)-\sqrt{(A+B\cdot\mathrm{tg}\beta)^2-(1+\mathrm{tg}^2\beta)(A^2+B^2-R^2)}}{(1+\mathrm{tg}^2\beta)}, \tag{2}$$

$$x_W(\beta) = \frac{(A+B\cdot\mathrm{tg}\beta)+\sqrt{(A+B\cdot\mathrm{tg}\beta)^2-(1+\mathrm{tg}^2\beta)(A^2+B^2-R^2)}}{(1+\mathrm{tg}^2\beta)}.$$

$$y_V(\beta) = x_V(\beta)\cdot\mathrm{tg}\beta;\ y_W(\beta)\cdot\mathrm{tg}\beta.$$

В формулах (2) область изменения угловой координаты β ограничена интервалом $[0:\beta_*]$ где β_* – угловая координата луча, касательного к образующей лопасти оперения. Величина β_* и координаты точки касания S_* определяются по формулам:

$$\beta_* = \mathrm{arctg}\frac{A\cdot B-\sqrt{A^2B^2-(A^2-R^2)(B^2-R^2)}}{(A^2-R^2)};$$

$$x_{S_*} = \frac{\left(A+B\dfrac{A\cdot B-\sqrt{A^2B^2-(A^2-R^2)(B^2-R^2)}}{(A^2-R^2)}\right)}{1+\left(\dfrac{A\cdot B-\sqrt{A^2B^2-(A^2-R^2)(B^2-R^2)}}{(A^2-R^2)}\right)^2}, \tag{3}$$

$$y_{S_*} = \frac{A\cdot B-\sqrt{A^2B^2-(A^2-R^2)(B^2-R^2)}}{(A^2-R^2)}.$$

$$\cdot \frac{\left(A + B\dfrac{A\cdot B - \sqrt{A^2B^2 - (A^2 - R^2)(B^2 - R^2)}}{(A^2 - R^2)}\right)}{1 + \left(\dfrac{A\cdot B - \sqrt{A^2B^2 - (A^2 - R^2)(B^2 - R^2)}}{(A^2 - R^2)}\right)^2}.$$

Теперь, с учетом полученных выше выражений, угловые координаты $\varphi_V(\beta)$, $\varphi_W(\beta)$ определяются так:

$$\varphi_V(\beta) = \arccos\frac{A - x_V(\beta)}{R};\ \varphi_W(\beta) = \arccos\frac{x_W(\beta) - A}{R}. \quad (4)$$

Введем обозначения:

$$\frac{d\varphi_V(\beta)}{d\beta} = \Phi_V(\beta); \qquad \frac{d\varphi_W(\beta)}{d\beta} = \Phi_W(\beta),$$

Откуда:

$$d\varphi_V(\beta) = \Phi_V(\beta)\cdot d\beta;\ d\varphi_W(\beta) = \Phi_W(\beta)\cdot d\beta.$$

Теперь элементарные центробежные силы, действующие на лопасть оперения в точках V и W, определятся так (рис. 2):

$$dF_{цб}(V) = S\left(\sqrt{x_V^2(\beta) + y_V^2(\beta)}\right)R\rho\omega^2\sqrt{x_V^2(\beta) + y_V^2(\beta)}\cdot\Phi_V(\beta)\cdot d\beta,$$

$$dF_{цб}(W) = S\left(\sqrt{x_W^2(\beta) + y_W^2(\beta)}\right)R\rho\omega^2\sqrt{x_W^2(\beta) + y_W^2(\beta)}\cdot\Phi_W(\beta)\cdot d\beta,$$

где $S\left(\sqrt{x_V^2(\beta) + y_V^2(\beta)}\right)$, $S\left(\sqrt{x_W^2(\beta) + y_W^2(\beta)}\right)$ – функции, описывающие изменение площади меридионального сечения лопасти оперения, в рамках рассматриваемой прямой задачи является известными функциями, при решении задачи в обратной постановке – возможные параметры оптимизации конструкции; ρ – плотность материала лопасти; ω – угловая скорость вращения снаряда.

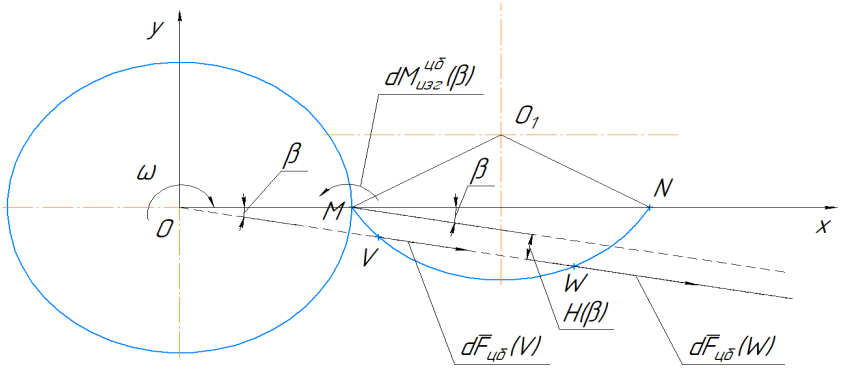


Рис. 2. Схема действия внешних силовых факторов

Суммарная элементарная центробежная сила в направлении угла β по радиусу:

$$dF_{цб}(\beta) = dF_{цб}(V) + dF_{цб}(W) =$$

$$= R\cdot\rho\cdot\omega^2\cdot\left[S\left(\sqrt{x_V^2(\beta) + y_V^2(\beta)}\right)\cdot\Phi_V(\beta)\cdot\sqrt{x_V^2(\beta) + y_V^2(\beta)} + \right.$$

$$\left. + S\left(\sqrt{x_W^2(\beta) + y_W^2(\beta)}\right)\cdot\Phi_W(\beta)\cdot\sqrt{x_W^2(\beta) + y_W^2(\beta)}\right]\cdot d\beta.$$

Плечо этой силы относительно точки М закрепления лопасти оперения:

$$H(\beta) = R \cdot \sin\beta .$$

Элементарный изгибающий момент в точке закрепления лопасти:

$$dM_{изг}^{цб}(\beta) = dF_{цб}(\beta) \cdot H(\beta) =$$

$$= R \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot [S\left(\sqrt{x_V^2(\beta) + y_V^2(\beta)}\right) \cdot \Phi_V(\beta) \cdot \sqrt{x_V^2(\beta) + y_V^2(\beta)} +$$

$$+ S\left(\sqrt{x_W^2(\beta) + y_W^2(\beta)}\right) \cdot \Phi_W(\beta) \cdot \sqrt{x_W^2(\beta) + y_W^2(\beta)}] \cdot \sin\beta \cdot d\beta.$$

Теперь суммарный изгибающий момент от действия центробежных сил в точке закрепления лопасти *M* определяется так:

$$M_{изг}^{цб}(\beta) = R \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot \int_0^{\beta_*} [S\left(\sqrt{x_V^2(\beta) + y_V^2(\beta)}\right) \cdot \Phi_V(\beta) \cdot \sqrt{x_V^2(\beta) + y_V^2(\beta)} +$$

$$+ S\left(\sqrt{x_W^2(\beta) + y_W^2(\beta)}\right) \cdot \Phi_W(\beta) \cdot \sqrt{x_W^2(\beta) + y_W^2(\beta)}] \cdot \sin\beta \cdot d\beta. \qquad (5)$$

Чтобы определить суммарную поперечную силу $Q_{цб}(M)$ в точке закрепления лопасти, необходимо спроектировать суммарные элементарные центробежные силы на оси координат *x* и *y* и провести независимое интегральное суммирование этих проекций по контуру лопасти:

$$dQ_{цб}^x(\beta) = dF_{цб}^x(\beta) = dF_{цб}(\beta) \cdot \cos\beta;$$

$$dQ_{цб}^y(\beta) = dF_{цб}^y(\beta) = dF_{цб}(\beta) \cdot \cos\beta.$$

Теперь:

$$Q_{цб}^x(M) = \int_0^{\beta_*} dQ_{цб}^x(\beta); \; Q_{цб}^y(M) = \int_0^{\beta_*} dQ_{цб}^y(\beta).$$

И окончательно:

$$Q_{цб}(M) = \sqrt{[Q_{цб}^x(M)]^2 + [Q_{цб}^y(M)]^2}. \qquad (6)$$

Для проведения оценки прочности материала лопасти в ее поперечном меридиональном сечении, проходящем через точку М, необходимо определить нормальную по отношению к сечению составляющую поперечной силы $N_{цб}(M)$. Для этого спроектируем ее полученные выше компоненты $Q_{цб}^x(M)$ и $Q_{цб}^y(M)$ на нормаль к сечению и проведем алгебраическое суммирование полученных проекций (рис. 3).

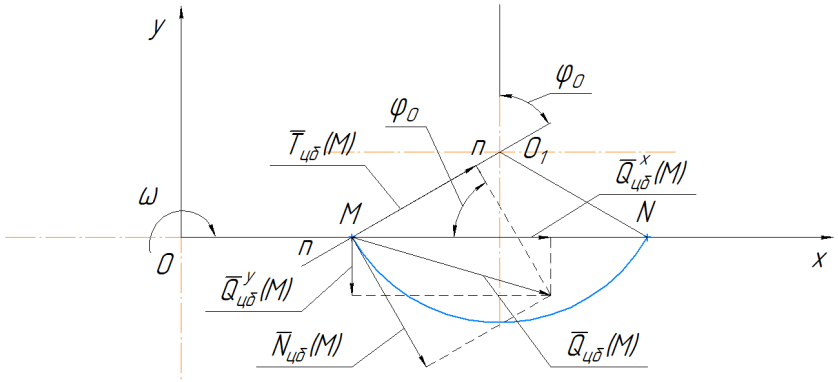


Рис. 3. Определение нормального компонента поперечной силы в меридиональном сечении лопасти в точке ее закрепления

В результате получаем:

$$N_{цб}(M) = Q^{x}_{цб}(M) \cdot \cos\varphi_0 + Q^{y}_{цб}(M) \cdot \sin\varphi_0. \quad (7)$$

Теперь условие прочности материала лопасти в точке ее закрепления приобретает вид [2]:

$$\sigma_{\max}(M) = \frac{N_{цб}(M)}{S(M)} + \frac{M^{цб}_{изг}(\beta)}{W_Z(M)} \le [\sigma], \quad (8)$$

где $S(M)$ и $W_z(M)$ – площадь поперечного сечения и осевой момент сопротивления поперечного меридионального сечения лопасти в точке ее закрепления соответственно; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение для материала лопасти.

Для проведения прочностных расчетов узла крепления лопасти необходимо предварительно определить поперечную силу $T_{цб}(M)$ в анализируемом сечении лопасти. Для этого спроектируем ее полученные выше компоненты $Q^{x}_{цб}(M)$ и $Q^{y}_{цб}(M)$ на плоскость сечения и также проведем алгебраическое суммирование полученных проекций:

$$T_{цб}(M) = Q^{x}_{цб}(M) \cdot \sin\varphi_0 + Q^{y}_{цб}(M) \cdot \cos\varphi_0. \quad (9)$$

По отношению к деталям узла крепления лопасти поперечная сила (9) является перерезывающей, и расчет прочности проводится по напряжениям среза и смятия и является стандартным.

В структуру формул (5) - (9) входят функции $x_P(\beta)$, $y_P(\beta)$, $x_Q(\beta)$, $y_Q(\beta)$, для которых выше получены общие рабочие выражения (1) и (2). Верхний предел интегрирования β_* в формулах (5) и (6) определяется с помощью выражения (3).

Таким образом, проведенное в работе моделирование позволяет определять интегральные внутренние силовые факторы, возникающие в меридиональном сечении лопасти оперения в зоне его крепления на корпусе снаряда и проводить оценку прочности материала лопасти, а также узлов его крепления и фиксации. Причем анализ полученного материала показывает, что решение построено в обобщенной связанной постановке: величины интегральных силовых факторов в зоне закрепления и фиксации лопасти зависят от геометрических характеристик и характеристик материала собственно лопасти, а также от кинематических параметров снаряда в рассматриваемой точке траектории. Это позволяет в перспективе экстраполировать данный подход на решение обратных задач оптимального прочностного проектирования узлов стабилизации РСЗО относительно их геометрических, кинематических, внешнебаллистических параметров, а также целенаправленно варьировать материалом свертывающейся лопасти стабилизатора. Перспективными, на наш взгляд, направлениями развития исследований являются дополнительное введение в структуру модели аэродинамических сил и моментов, воздействующих на лопасть оперения и их учет в формировании напряженного состояния ее материала, а также получение рабочих зависимостей для определения интегральных внутренних силовых факторов в произвольном меридиональном сечении лопасти. Последнее актуально для случаев, когда в конструкции лопасти имеются ослабляющие ее геометрические аномалии или концентраторы напряжений.

Список литературы

1. Орлов А.Р. Основы устройства и функционирования снарядов реактивных систем залпового огня: учебное пособие. Тула: ТулГУ, 2002. 156 с.

2. Светлицкий В.А. Механика стержней: учебник для ВТУЗов. В 2-хчастях. Часть 1. М.: Высшаяшкола, 1987. 320 с.

Баранов Виктор Леопольдович, д-р техн. наук, профессор, anton.soloviev2011@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Воротилин Михаил Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, проректор, anton.soloviev2011@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Соловьев Антон Александрович, студент, anton.soloviev2011@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Чибирев Богдан Олегович, студент, chibirev.bogdan98@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

EVALUATION OF THE DURABILITY OF THE BLADE OF A COLLAPSIBLE TAIL MLRS IN THE FIELD OF CENTRIFUGAL FORCES OF INERTIA

V.L. Baranov, M.S. Vorotilin, A.A. Solovyev, B.O. Chibirev

A generalized solution is obtained for the direct problem of strength design of cantilevered curved blades and attachment and fixation units of the collapsing plumage of the MLRS in the field of centrifugal inertia forces at the stage of transition from active to passive sections of the trajectory.

Key words: plumage blade, the site of fixation, centrifugal force of inertia, the integral bending moments and shear forces, the parameters of the stress state, strength.

Baranov Viktor Leopoldovich, doctor of technical sciences, professor, anton.soloviev2011@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Vorotilin Mikhail Sergeevich, doctor of technical sciences, professor, provost, anton.soloviev2011@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Solovyev Anton Aleksandrovich, student, anton.soloviev2011@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Chibirev Bogdan Olegovich, student, chibirev.bogdan98@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 531

ДИНАМИКА КРУГЛОЙ ПУЛИ В ГЛАДКОМ КАНАЛЕ СТВОЛА

Д.Р. Лахов, В.В. Никольский, А.С. Селивёрстов

В разработке оружия всегда необходимо производить математическое моделирование динамики пули проходящей через канал ствола, при этом пуля и канал ствола являются недеформируемыми объектами. Иллюстрируется применение метода систем неудерживающих связей на примере математического моделирования динамики круглой пули в гладком канале ствола.

Ключевые слова: моделирование, динамика.

При разработке спортивного и охотничьего оружия проектировщик сталкивается с необходимостью математического моделирования динамики пули или дроби (картечи) в канале ствола переменного сечения [2]. Проиллюстрируем возможности

математического описания [1] на примере моделирования движения сферической пули по трубе переменного сечения. Пулю будем рассматривать как недеформируемую материальную точку, а ствол как недеформируемое твердое тело.

При построении матрицы C функционалов [1] для тел рассматриваемой механической системы примем модель твердого тела с местными деформациями и одинаковыми жесткостями в предполагаемых точках контакта. Допустим также, что активные силы не входят в функционал.

На рис. 1 изображена составная поверхность, приближенно аппроксимирующая поверхность канала ствола гладкоствольного ружья. Пунктиром обозначены ограничения, которые накладывает эта поверхность на координаты центра масс пули. При расчетах использовались следующие размеры трубы (мм): $r_0 = 2$, $r_1 = 0{,}625$, $r_2 = 0{,}5$, $l_I = 70$, $l_{II} = 17$, $l_{III} = 589$, $l_{IV} = 24$.

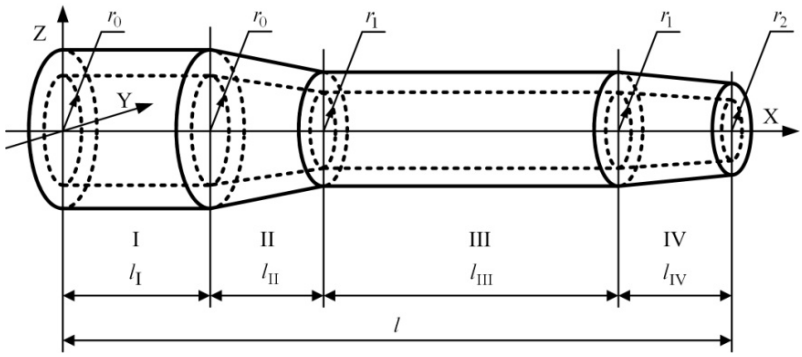


Рис. 1. Схема составной поверхности канала гладкого ствола

Допустимые области локализации центра масс пули в зависимости от участка ствола описываются неравенствами:

I – цилиндр (патронник), $0 \le x < l_I$:

$$\frac{1}{2}\left(-y^2 - z^2 + r_0^2\right) \ge 0,$$

II – усеченный конус (снарядный вход), $l_I \le x < l_I + l_{II}$:

$$\frac{1}{2}\left\{-y^2 - z^2 + \frac{[r_0 l_{II} - (r_0 - r_1)(x - l_I)]^2}{l_{II}^2}\right\} \ge 0,$$

III – цилиндр, $l_I + l_{II} \le x < l_I + l_{II} + l_{III}$:

$$\frac{1}{2}\left(-y^2 - z^2 + r_1^2\right) \ge 0,$$

IV – усеченный конус (дульное сужение),

$$l_I + l_{II} + l_{III} \le x \le l_I + l_{II} + l_{III} + l_{IV};$$

$$\frac{1}{2}\left\{-y^2 - z^2 + \frac{[r_1 l_{IV} - (r_1 - r_2)(x - l_I - l_{II} - l_{III})]^2}{l_{IV}^2}\right\} \ge 0.$$

Величина активной силы *P* (силы давления пороховых газов), действующей на пулю определялась по известной формуле Вале:

$$P = S p_{\max} \frac{t}{t_{\max}} e^{1 - \frac{t}{t_{\max}}},$$

где $p_{\max}$ – максимальная величина давления; $t_{\max}$ – момент времени, соответствующий наступлению максимального давления; *S* – площадь, на которую воздействует давление; *t* – текущее время.

При расчетах принималось, что $p_{\max} = 800 \cdot 10^5$ Па, $t_{\max} = 3{,}6 \cdot 10^{-4}$ с, линия действия силы давления не совпадает с осью канала ствола. При моделировании динамики пули коэффициент трения $f = 0{,}15$, коэффициент восстановления $\varepsilon = 0{,}4$, масса пули $m = 30 \cdot 10^{-3}$ кг.

Результаты расчетов, проведенных при начальных условиях $t = 0$, $\bar{q}^T = \left[52 \cdot 10^{-3} \quad 0 \quad 0\right]$, $\dot{\bar{q}} = 0$ представлены на рис. 3 – 9.

На рис. 2 представлены зависимости $x = x(t)$ (верхний график) и $\dot{x} = \dot{x}(x)$ (нижний график). На рис. 3, 4 соответственно представлены зависимости $y(x)$, $\dot{y}(x)$, $z(x)$, $\dot{z}(x)$. Из этих графиков видно, что в дульный момент пуля имеет отличные от нуля составляющие скорости по осям *y* и *z*.

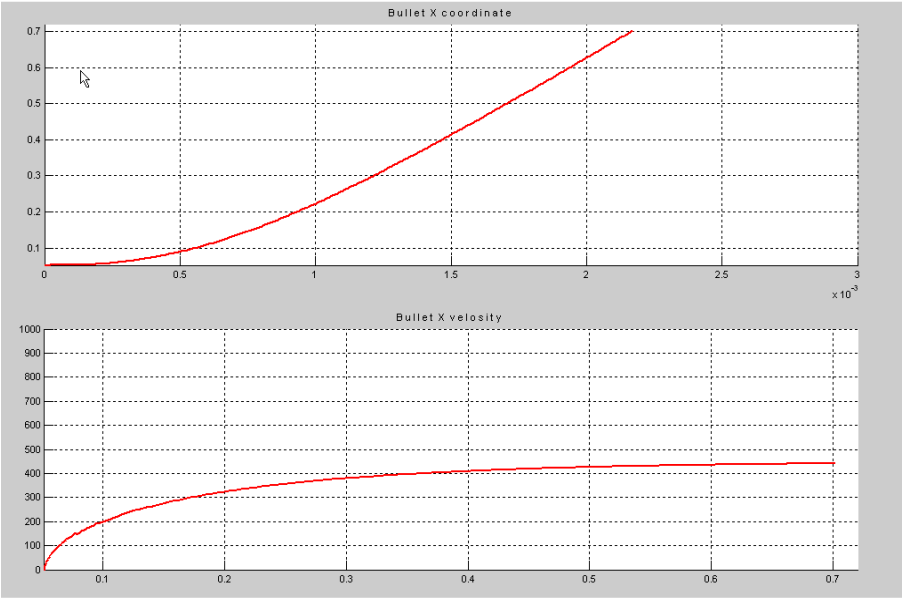


Рис. 2. Графики зависимостей $x = x(t)$ ***и*** $\dot{x} = \dot{x}(x)$

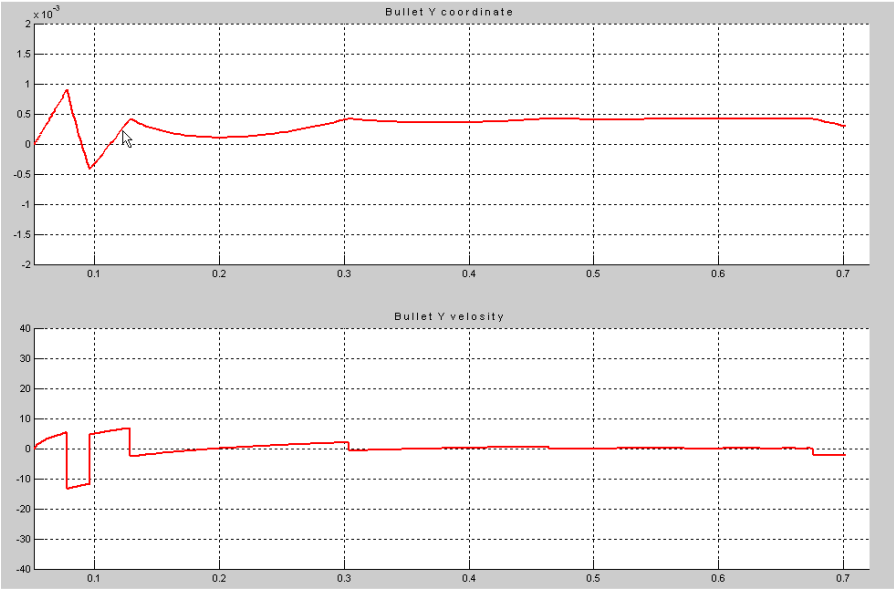


Рис. 3. Графики зависимостей $y(x)$, $\dot{y}(x)$

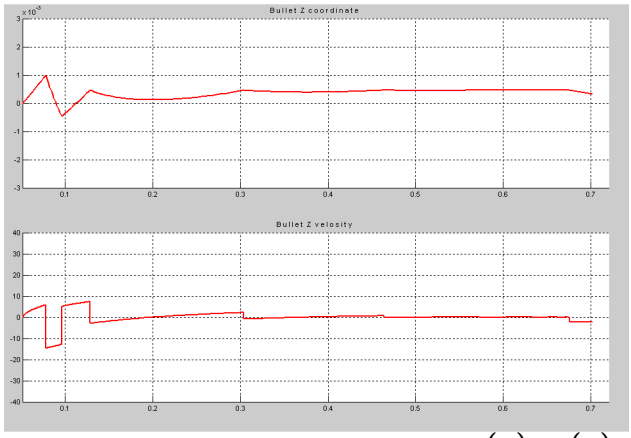


Рис. 4. Графики зависимостей $z(x)$, $\dot{z}(x)$

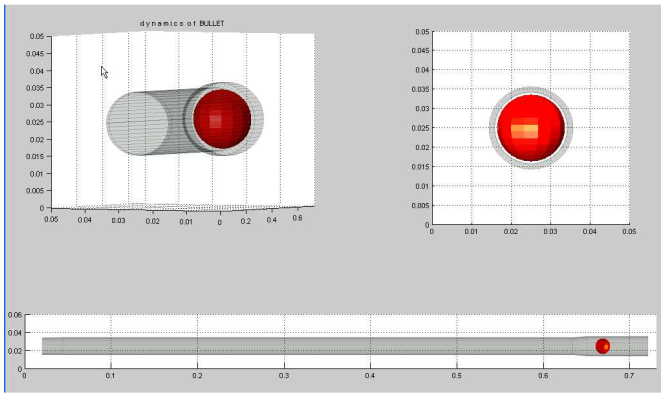


Рис. 5. Положение пули в начальный момент времени

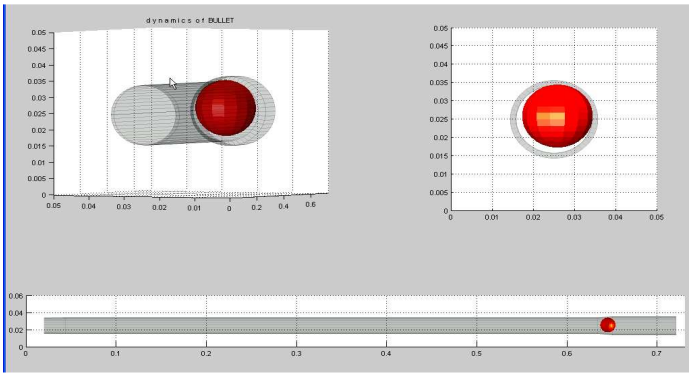


Рис. 6. Пуля в момент соударения в снарядном входе

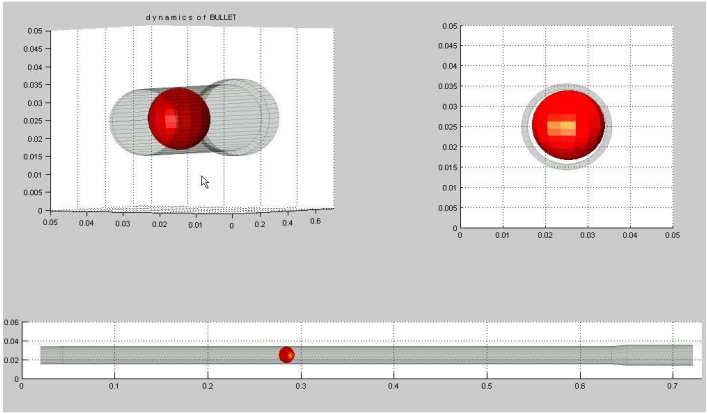


Рис. 7. Пуля в момент соударения в цилиндрической части

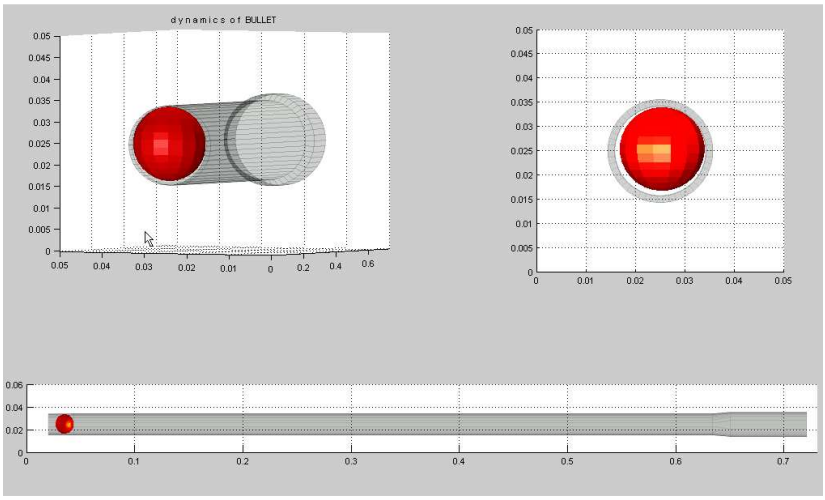


Рис. 8. Пуля в момент соударения в дульном сужении

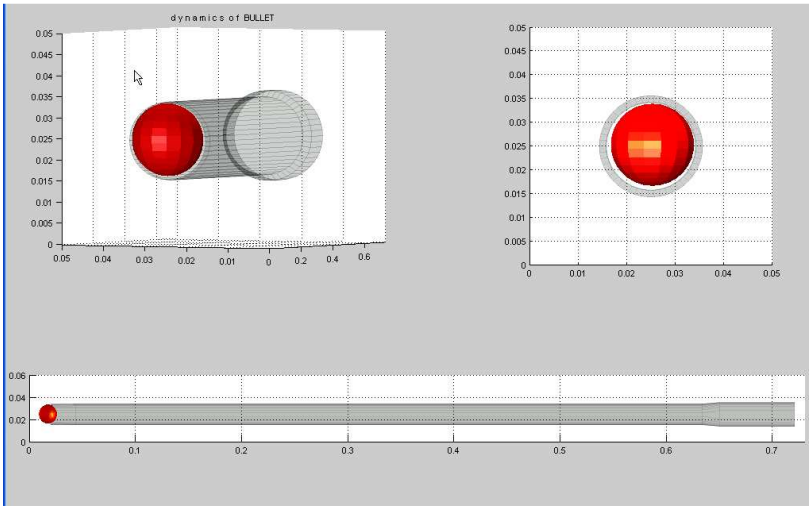


Рис. 9. Пуля в момент соударения в дульный момент времени

Также на рис. 5 – 9 показаны положения пули соответственно в начальный момент времени; в моменты соударений в снарядном входе, в цилиндрической части и в дульном сужении, а также в дульный момент времени.

Список литературы

1. Никольский В. В. Математическое моделирование динамики механизмов и механических подсистем циклической автоматики. Тула: ТулГУ, 2008. 260 с.

2. Блюм М. М., Шишкин И. Б. Охотничье ружьё. М.: Лесн. пром-ть, 1983. 216 с.

Лахов Дмитрий Романович, аспирант, skyllstuf@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Никольский Владимир Витальевич, д-р техн. наук, профессор, nvv.nb@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Селивёрстов Антон Сергеевич, аспирант, toto71rus@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DYNAMICS OF A ROUND BULLET IN A SMOOTH BARREL

D.R. Lakhov, V.V. Nikolsky, A.S. Seliverstov

In the development of weapons, it is always necessary to perform mathematical modeling of the dynamics of a bullet passing through the barrel, while the bullet and the barrel are non-deformable objects. The application of the method of systems of non-holding links is illustrated by the example of mathematical modeling of the dynamics of a round bullet in a smooth bore.

Key words: modeling, dynamics.

Lakhov Dmitry Romanovich, postgraduate, skyllstuf@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Nikolsky Vladimir Vitalievich, doctor of technical sciences, professor, nvv.nb@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Seliverstov Anton Sergeevich, postgraduate, toto71rus@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 531

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ МЕХАНИЗМОВ АВТОМАТИКИ С НЕУДЕРЖИВАЮЩИМИ СВЯЗЯМИ

В.В. Никольский, С.И. Кузин

Рассмотрены вопросы математического моделирования механических систем, стеснённых неудерживающими связями. Приведены необходимые и достаточные условия нахождения точек системы на связях и алгоритм численного интегрирования уравнений движения.

Ключевые слова: механическая система, неудерживающие связи, динамика.

Математическое моделирование динамики механических систем, подчиненных односторонним связям, относится к самым сложным задачам механики абсолютно твёрдого тела [1, 2, 3-7].

Аппарат аналитической механики, разработанный для систем с удерживающими связями, плохо приспособлен для изучения движения систем с односторонними связями. Это объясняется тем, что неудерживающая связь превращает объект исследования в систему с переменным числом степеней свободы. Специального математического описания динамики систем с освобождающими связями, по-видимому, до работ [3 – 5] получено не было, так как неравенства, выражающие такие связи – очень неудобный объект при преобразованиях. Кроме того, общепринятым было мнение, что никаких специальных уравнений и не требуется, поскольку в промежутке между двумя соударениями система может рассматриваться как лишенная связи, и на соответствующем интервале времени могут использоваться уравнения для систем с удерживающими связями. На границе области, соответствующей напряжению или ослаблению какой-либо из связей, осуществляется пересчет начальных условий и изменение математического описания динамики для продолжения решения на следующем промежутке времени, характеризующемся неизменностью структуры изучаемой механической системы. Сшивая решения, полученные в разных областях, по начальным условиям можно построить решение задачи для любого момента времени. Такой прием называется методом припасовывания.

Численная реализация ортодоксального метода припасовывания затрудняется необходимостью определения момента напряжения-ослабления связей, периодического анализа ситуации и программного переформирования математического описания

динамики механической системы. В работах [3 - 6] показано, что проблему исключения освобождающих связей можно решить при помощи негладких необратимых замен обобщенных координат. Получаемые при этом дифференциальные уравнения динамики типа Рауса определяют движение на бесконечном интервале времени, избавляют от необходимости рассматривать движение по кускам, делают применимыми для таких систем основные методы нелинейной механики. Однако использовать предлагаемый прием в качестве основы для построения универсального программного обеспечения математического моделирования динамики механизмов циклической автоматики, по-видимому, не представляется возможным.

Разберем подробнее алгоритм моделирования динамики систем с неудерживающими связями, который является следствием приемов интегрирования уравнений такого рода систем, предлагаемых в работах по механике абсолютно твердого тела [1, 2, 7].

Будем рассматривать механическую систему, состоящую из абсолютно твердых тел, положение которых в пространстве задается [n×1] матрицей обобщенных координат $\overline{q}$, подчиненных ν неудерживающим неидеальным связям вида:

$$\overline{F}_I(\overline{q}) \geq 0. \tag{1}$$

Остановимся, прежде всего, на необходимых и достаточных условиях того, что механическая система на некотором достаточно малом интервале времени Δt не покинет связи. Рассмотрим выражение $F_\alpha(\overline{q})$ некоторой α-ой связи из системы (1) как сложную функцию времени $F_\alpha(\overline{q}(t))$. Дадим времени t некоторое приращение $\Delta t > 0$ и разложим функцию $F_\alpha(\overline{q}(t))$ в ряд по степеням Δt:

$$F_\alpha(\overline{q}(t+\Delta t)) = F_\alpha(\overline{q}(t)) + \frac{dF_\alpha(\overline{q}(t))}{dt}\Delta t + \frac{d^2F_\alpha(\overline{q}(t))}{dt}\frac{\Delta t^2}{2} + \ldots$$
$$\ldots + \frac{d^{(s)}F_\alpha(\overline{q}(t))}{dt^s}\frac{\Delta t^s}{s!} + \varepsilon_{s+1} \tag{2}$$

Поскольку всегда $\Delta t > 0$, то производные в разложении (2) следует понимать как правые производные, то есть вычисленные в предположении $\Delta t \to 0$ при $\Delta t > 0$.

Если механическая система движется в соответствии со связью $F_\alpha(\overline{q}) = 0$ и момент t не является моментом схода системы с этой связи, то при любом Δt, не превосходящим некоторой границы левая часть (2), а, следовательно, и правая будут равны нулю. Таким образом, для момента t и любого s будут выполняться равенства:

$$F_\alpha(\overline{q}(t)) = 0; \quad \frac{dF_\alpha(\overline{q}(t))}{dt} = 0; \quad \frac{d^2F_\alpha(\overline{q}(t))}{dt} = 0; \ \ldots$$
$$\ldots \frac{d^{(s)}F_\alpha(\overline{q}(t))}{dt^s} = 0. \tag{3}$$

Равенства (3) являются необходимыми и достаточными условиями нахождения системы на α-ой связи.

Необходимыми условиями нахождения механической системы на α-ой связи служат равенства:

$$F_\alpha(\overline{q}(t)) = 0; \quad \frac{dF_\alpha(\overline{q}(t))}{dt} = 0; \quad \frac{d^2F_\alpha(\overline{q}(t))}{dt} = 0. \tag{4}$$

Поскольку связи (1) не зависят явно от времени, равенства (4) можно переписать в виде:

$$F_\alpha = 0, \tag{5}$$

$$\frac{\partial F_\alpha}{\partial \overline{q}}\dot{\overline{q}} = 0, \tag{6}$$

$$\frac{\partial F_\alpha}{\partial \bar{q}}\,\ddot{\bar{q}} + D_\alpha = 0. \qquad (7)$$

Приведем теперь выражения для условий, которые накладывает освобождающая связь на скорость и ускорения механической системы в момент ослабления.

Предположим, что теперь момент *t* является моментом схода системы со связи $F_\alpha(\bar{q}(t))$. Это означает, что справедливы следующие соотношения

$$F_\alpha(\bar{q}(t)) = 0, \qquad (8)$$

$$F_\alpha(\bar{q}(t+\Delta t)) > 0. \qquad (9)$$

Сравнивая выражения (8), (9) с разложением (2), получаем, что для момента ослабления связи должно быть справедливо неравенство

$$\frac{d F_\alpha(\bar{q}(t))}{dt}\Delta t + \frac{d^2 F_\alpha(\bar{q}(t))}{dt}\frac{\Delta t^2}{2} + s_3 > 0. \qquad (10)$$

Неравенство (10) справедливо при сколь угодно малом $\Delta t > 0$, поэтому из (10) следует, что на скорости точек в момент схода системы с односторонней связи накладывается условие:

$$\frac{d F_\alpha(\bar{q}(t))}{dt} \geq 0, \qquad (11)$$

что для связей вида (1) эквивалентно следующему выражению:

$$\nabla F_\alpha\,\dot{\bar{q}} \geq 0. \qquad (12)$$

Если в момент ослабления связи неравенство (12) становится строгим, то, как видно из выражения (10), вторая производная $\frac{d^2 F_\alpha(\bar{q}(t))}{dt^2}$ может иметь любой знак. Таким образом, в этом случае связь не налагает ограничений на ускорения точек системы. Если же соотношение (11) выполняется как равенство, то из него следует условие для ускорений:

$$\frac{d^2 F_\alpha(\bar{q}(t))}{dt^2} \geq 0 \qquad (13)$$

или для связей вида (1):

$$\nabla F_\alpha\,\ddot{\bar{q}} + D_\alpha \geq 0. \qquad (14)$$

Согласно принятым допущениям, одновременно в равенства могут обращаться $c_I \leq \upsilon$ соотношений (1). Матрицу-столбец, содержащую такие соотношения, будем обозначать, как $\bar{F}_{cI}$. Таким образом будем иметь:

$$\bar{F}_{cI} = 0. \qquad (15)$$

Матрица Якоби J_{cI} левых частей равенств (15) должна иметь полный ранг:

$$rank\, J_{cI} = c_I. \qquad (16)$$

Множество индексов всех неудерживающих связей обозначим через $Set(I)$, а множество индексов связей входящих в систему (15) – через $Set(cI)$, $Set(cI) \subset Set(I)$.

Множитель λ_α, соответствующий α-ой неудерживающей связи должен удовлетворять условию:

$$\lambda_\alpha \geq 0. \qquad (17)$$

Когда α-ая связь перестает действовать; λ_α обращается в нуль.

Перейдем непосредственно к алгоритму численного интегрирования уравнений движения. Для упрощения рассмотрим одношаговый метод интегрирования. Пусть нам известны начальные значения величин обобщенных координат и скоростей механической системы для *k*-го шага интегрирования:

$$t_k, \overline{q}_k, \dot{\overline{q}}_k . \tag{18}$$

Используя данные (18) и условия (5), (6), формируем набор связей

$$\left(\overline{F}_{cI}\right)_k = 0, \tag{19}$$

реакции которых могут быть неотрицательными на *k*-ом шаге. Индексы связей, входящих в (19) помещаем во множество $Set(cI)_k$, которое в итоге будет содержать $(c_I)_k$ элементов.

Уравнения динамики для рассматриваемых условий примут вид:

$$\left(J_{cI}\right)_k G^{-1}\left(J_{cI}+\Phi_{cI}\right)_k^T \overline{\lambda}_k^* = -\left(\overline{D}_{cI}\right)_k - \left(J_{cI}\right)_k G^{-1}\left(\overline{Q}\right)_k, \tag{20}$$

где $\overline{\lambda}_k^*$ – столбцовая матрица высоты c_I, составленная из множителей связей, индексы которых входят во множество $Set(cI)_k$. Полная матрица величин нормальных реакций на *k*-ом шаге $\overline{\lambda}_k$ имеет размерность $[\nu\times 1]$. Ее компоненты с индексами, принадлежащими множеству $Set(cI)_k$, содержат соответствующие компоненты $\overline{\lambda}_k^*$. Остальные компоненты равны нулю; $\left(J_{cI}\right)_k$, $\left(\Phi_{cI}\right)_k$, $\left(\overline{D}_{cI}\right)_k$ – матрицы, содержащие строки соответствующих матриц $J_I, \Phi_I, \overline{D}_I$ [8] с индексами, принадлежащими множеству $Set(cI)_k$.

Предположим, что выполняются условия малого трения. Тогда из (16) следует справедливость равенства [9]:

$$rank\left[\left(J_{cI}\right)_k G^{-1}\left(J_{cI}+\Phi_{cI}\right)_k^T\right] = \left(cI\right)_k \tag{21}$$

и система уравнений (20) может быть разрешена относительно неизвестных $\overline{\lambda}_k^*$. Определим компоненты $\overline{\lambda}_k^*$.

Если $\overline{\lambda}_k^* \ge 0$, то, используя равенства [8]

$$\ddot{\overline{q}}_k = G^{-1}\left(J_{cI}+\Phi_{cI}\right)_k^T \overline{\lambda}_k + G^{-1}\overline{Q}_k, \tag{22}$$

вычисляем ускорения $\ddot{\overline{q}}_k$ и делаем шаг интегрирования.

В противном случае (если, хотя бы одна компонента матрицы $\overline{\lambda}_k^*$ отрицательна), необходимо определить, какие связи будут ослаблены системой на *k*-ом шаге интегрирования и исключить их из системы (19).

Если матрица коэффициентов перед $\overline{\lambda}_k^*$ в уравнениях (20) имеет диагональный вид, то исключить следует те связи, которым соответствуют отрицательные множители Лагранжа. Эти множители полагаются равными нулю, соответствующие им связи выводятся из набора (19), а их индексы исключаются из множества $Set(cI)_k$. Соответственно изменениям в множестве $Set(cI)_k$ преобразуются матрицы $(J_{cI})_k$, $(\Phi_{cI})_k$, $(\overline{D}_{cI})_k$ и $\overline{\lambda}_k^*$. После перечисленных преобразований по формулам (22) определяем ускорения и проводим шаг интегрирования.

Если матрица $\left(J_{cI}\right)_k G^{-1}\left(J_{cI}+\Phi_{cI}\right)_k^T$ имеет общий вид, то величины нормальных реакций зависимы между собой. В этом случае можно предложить следующую последовательность действий.

Введем множество A_l, элементами которого являются $m = C_\nu^l$ различных сочетаний индексов длины *l*, принадлежащих множеству $Set(cI)_k$. Присвоим каждому элементу множества A_l уникальный порядковый номер (индекс). Таким образом $A_l = \{a_1, \ldots, a_m\}$. Символами $\{a_i\}$ будем обозначать множество индексов из $Set(cI)_k$, входящих в a_i, то есть $\{a_i\} \subset Set(cI)_k$.

Полагаем $l = 0$.

(α) $l = l + 1$. Если $l > c_I$, то переходим к пункту (η).

Вычисляем $m = C_{\nu}^{l}$. Формируем множество A_l.

Полагаем $i = 0$.

(β) $i = i + 1$. Если $i > m$, то переходим к пункту (α).

Определяем множество $B_i = Set(cI)_k / \{a_i\}$.

(γ) Формируем матрицы $(J_{cI})_k$, $(\Phi_{cI})_k$, $(\overline{D}_{cI})_k$ и определяем состав компонент вектора $\overline{\lambda}_k^*$ в соответствии с множеством B_i.

(δ) Из системы уравнений (20) находим величины компонент вектора $\overline{\lambda}_k^*$.

Если среди компонент $\overline{\lambda}_k^*$ есть отрицательные, то переходим к пункту (β).

(ε) Если $\overline{\lambda}_k^* \geq 0$, то проверяем реализуемость выбранной расчетной схемы. Для этого подставляем полученный набор $\overline{\lambda}_k^*$ в равенства системы (20) со строчными индексами, принадлежащими множеству $\{a_i\}$, и вычисляем их невязки $\overline{\delta}_{\{ai\}}$.

Если хотя бы одна из компонент $\overline{\delta}_{\{ai\}}$ отрицательна, то переходим к пункту (β).

В противном случае, если $\overline{\delta}_{\{ai\}} \geq 0$, то, согласно неравенству (14), исключенные нами связи на *k*-ом шаге не будут действовать. Расчетная схема выбрана верно.

(ζ) Формируем набор $\overline{\lambda}_k$. По формулам (22) определяем $\ddot{\overline{q}}_k$.

Переходим к интегрированию.

(η) Реализующаяся схема не найдена. Окончание расчетов.

Необходимость начинать поиск реализующейся расчетной схемы с последовательного исключения одной из связей (15) вне зависимости от количества отрицательных компонент $\overline{\lambda}_k^*$ проиллюстрируем на простом примере. Пусть уравнения (20) для некоторой механической системы, подчиненной трем неудерживающим связям, с учетом заданных на *k*-ом шаге начальных условий сводится к виду:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & \sqrt{2} \end{bmatrix} \overline{\lambda} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{23}$$

Разрешая систему (23) относительно неизвестных $\overline{\lambda}$, находим:

$$\lambda_1 = -\frac{1}{\sqrt{2}-1} < 0, \quad \lambda_2 = -\frac{1}{\sqrt{2}-1} < 0, \quad \lambda_3 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}-1} > 0. \tag{24}$$

Как видно, в решении (24) присутствуют две отрицательные компоненты. Однако несложные вычисления показывают, что для получения допустимого вектора $\overline{\lambda} \geq 0$ достаточно исключить только третью связь (хотя $\lambda_3 \geq 0$). Действительно, исключая третью связь, вместо (23) будем иметь:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \lambda_3 = 0 \tag{25}$$

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 1 > 0 \tag{26}$$

Невязка для третьего уравнения системы (26) равна $\delta_3 = 2 > 0$. Следовательно, найдена реализующаяся расчетная схема. Попытка исключить сразу две связи привела бы к ошибке или к излишнему количеству вычислений.

Проверка полученного допустимого решения (пункт (ε) алгоритма) предназначена для выделения реализующегося решения в случае, когда допустимое решение неединственное. Приведем простейший пример. Предположим, что система уравнений (22) приводится к виду:

$$\begin{bmatrix} 1 & \sqrt{2}/2 \\ \sqrt{2}/2 & 1 \end{bmatrix} \bar{\lambda} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}/2 \\ (\sqrt{6}-\sqrt{2})/4 \end{bmatrix}. \qquad (27)$$

Очевидно, что вектор $\bar{\lambda}^T = \begin{bmatrix} (1+\sqrt{3})/2 & -\sqrt{2}/2 \end{bmatrix}$, являющийся решением системы (27), недопустим. Будем последовательно исключать по одной связи. Исключив первую связь, будем иметь:

$$\lambda_1 = 0, \quad \lambda_2 = (\sqrt{6}-\sqrt{2})/4 > 0\,. \qquad (28)$$

После исключения второй связи получим:

$$\lambda_1 = \sqrt{3}/2 > 0, \quad \lambda_2 = 0. \qquad (29)$$

Наборы компонентов (28) и (29) допустимые. Проведем проверку на реализуемость расчетной схемы. Будем иметь соответственно $\delta_1 = -(\sqrt{3}+1)/4 < 0$ для набора (28) и $\delta_2 = \sqrt{2}/4 > 0$ для набора (29). Таким образом, реализуется расчетная схема (28).

Список литературы

1. Суслов Г.К. Теоретическая механика. М.; Л.: Гос. изд-во тех.-теор. лит., 1944. 656 с.

2. Кильчевский Г.К. Курс теоретической механики. М.: Наука, 1977.

3. Журавлев В.Ф. Уравнения движения механических систем с идеальными односторонними связями // Прикладная математика и механика. 1978. Т. 42. Вып. 5. С. 781-788.

4. Журавлев В.Ф. Механика систем с односторонними связями // Успехи механики. 1989. № 2. С. 37-69.

5. Журавлев В.Ф., Фуфаев Н.А. Механика систем с неудерживающими связями. М.: Наука, 1993. 240 с.

6. Журавлев В.Ф. Основы теоретической механики. М.: Наука. Физматлит, 1997. 320 с.

7. Теоретическая механика. Вывод и анализ уравнений движения на ЭВМ. Ч. 1 / В.Г. Веретенников, И.И. Капов, А.П. Маркеев и др.; под общ. ред. В.Г. Веретенникова. М.: Высшая школа, 1990. 174 с.

8. Никольский В.В. Математическое моделирование динамики механизмов и механических подсистем циклической автоматики. Тула: ТулГУ, 2008. 260 с.

9. Стренг Г. Линейная алгебра и ее применения. М.: Мир, 1980. 456 с.

Никольский Владимир Витальевич, д-р техн. наук, профессор, nvv.nb@mail.ru, Росс*ия, Тула, Тульский государственный университет*,

Кузин Святослав Игоревич, аспирант, godslav@yandex.ru, Россия, Т*ула, Тульский государственный университет*

FEATURES OF MATHEMATICAL MODELING OF THE DYNAMICS OF AUTOMATION MECHANISMS WITH UNILATERAL CONSTRAINTS

V.V. Nikolsky, S.I. Kuzin

The issues of mathematical modeling of mechanical systems constrained by unilateral constraints are considered. The necessary and sufficient conditions for finding the points of the system on constraints and an algorithm for the numerical integration of the equations of motion are given.

Key words: mechanical system, unilateral constraints, dynamics.

Nikolsky Vladimir Vitalyevich, doctor of technical sciences, professor, nvv.nb@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kuzin Svyatoslav Igorevich, postgraduate, godslav@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.317

К ВОПРОСУ ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА СИСТЕМ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

А.М. Пушкарёв, А.Г. Здоровцов

Рассматривается вопрос рационального выбора технических средств обеспечения комплексной безопасности охраняемого объекта за счет сгенерированного множества по соответствию тактико-техническим и экономическим ограничениям. Предложена методика выбора технических средств для построения систем физической защиты объекта.

Ключевые слова: система физической защиты, комплексная безопасность, охраняемый объект.

Проблемы эффективности функционирования систем физической защиты объектов всегда актуальны. Эффективность функционирования системы физической защиты объектов в общем случае есть качественное понятие, отражающее важнейшее свойство системы – ее соответствие тем целям, для достижения которых она создана [1]. Количественное выражение эффективности характеризует способность системы физической защиты выполнять поставленную перед ней задачу. Именно потому эффективность является важнейшим свойством системы. Поэтому основная задача, решаемая в ходе исследования эффективности системы физической защиты, состоит в обосновании рекомендаций по формированию множества рациональных вариантов построения технических средств обеспечения комплексной безопасности охраняемого объекта, исходя из наивысшей эффективности системы физической защиты в широком диапазоне условий ее применения. Эта задача может решаться на основе моделирования процесса функционирования технических средств обеспечения комплексной безопасности охраняемого объекта, оценки и сравнения прорабатываемых вариантов. Следовательно, задача формирования множества рациональных вариантов построения технических средств обеспечения комплексной безопасности охраняемого объекта (задача совершенствования физической защиты) ставится как задача оптимального синтеза системы с управлением [2].

Современные системы физической защиты представляют собой совокупность трех взаимоувязанных компонентов [3]: 1) системотехнических решений, отражающих в максимальной степени специфику создаваемой системы, ее уникальность (состав, физическая и логическая структура, требования, методология проектирования, методы моделирования и проведения испытаний); 2) нормативно-технических документов, регламентирующих стандартные решения по построению, функционированию, взаимодействию и развитию системы, а также условия и ограничения с учетом действующих нормативно-правовых и нормативно-технических документов (стандартов, рекоменда-

ций); 3) аппаратных средств и базовых программных комплексов, являющихся реальной материальной основой, проектируемой системы физической защиты и реализующих требуемый перечень функций по обеспечению комплексной безопасности охраняемого объекта, а также защите системы от случайных и преднамеренных воздействий.

С учетом того, что современные системы физической защиты представляют собой сложные системы, требующие значительных организационных и материальных затрат и функционирующие в течение длительного периода времени, возникает задача рационального выбора технических средств обеспечения комплексной безопасности охраняемого объекта, обеспечивающих возможность их применения как на существующих, так и на перспективных объектах с учетом совершенствования технологий безопасности [1].

Обоснованный выбор технических средств обеспечения комплексной безопасности охраняемого объекта, удовлетворяющих предъявляемым к системе физической защиты требованиям и реализующих выбранные системотехнические решения и технологии, может осуществляться следующим образом. На первом этапе производится анализ возможных типов технических средств обеспечения комплексной безопасности охраняемого объекта, эксплуатационные показатели которых удовлетворяют системным и техническим требованиям разрабатываемой системы физической защиты. В качестве показателей для выбора технических средств обеспечения комплексной безопасности охраняемого объекта могут использоваться наиболее важные для конкретного объекта основные характеристики, в первую очередь, такие, как эффективность и стоимость. В методах поддержки принятия решений эти характеристики выступают в качестве основных критериальных показателей [1]. Необходимо отметить, что для различных охраняемых объектов степень важности того или иного показателя различна, при этом конкретный набор показателей для выбора технических средств обеспечения комплексной безопасности охраняемого объекта определяется спецификой создаваемой системы физической защиты.

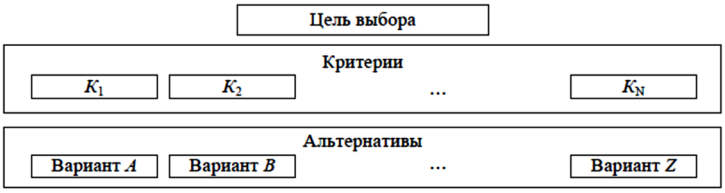
В результате проведенного анализа по сформированной системе показателей может быть выбрано небольшое число (четыре–шесть) типов технических средств обеспечения комплексной безопасности охраняемого объекта, наиболее соответствующих всем предъявляемым требованиям и сопоставимых друг с другом по техническим характеристикам и возможностям. На втором этапе из них необходимо выбрать один наиболее приемлемый для данного объекта с точки зрения технических и эксплуатационных показателей вариант.

В предлагаемой методике для сравнительной оценки и выбора наилучшего варианта целесообразно использовать один из методов оценки многокритериальных альтернатив – метод аналитической иерархии [4], достаточно широко используемый для сравнения и выбора из небольшого числа заданных альтернатив и позволяющий использовать в задачах принятия решений математические методы для обработки субъективных предпочтений экспертов.

С учетом вышеизложенного предлагается методика выбора технических средств для построения системы физической защиты, включающая следующие этапы: 1) производится выбор из всего множества технических средств обеспечения комплексной безопасности охраняемого объекта образцов, максимально удовлетворяющих требованиям для конкретного объекта, на основе системы основных показателей; 2) с применением метода аналитической иерархии для отобранной группы технических средств реализуются следующие процедуры: структуризация задачи в виде иерархической структуры с несколькими уровнями «цель–критерии–альтернативы»; попарные сравнения элементов каждого уровня; вычисление для элементов каждого уровня коэффициентов важности и весов критериев; определение наилучшей альтернативы на основе подсчетов количественных показателей каждой из альтернатив.

Предположим, что выбор технических средств обеспечения комплексной безопасности охраняемого объекта при проектировании системы физической защиты производится по нескольким критериям – K1, K2, ..., KN. По своим эксплуатационным,

техническим и стоимостным показателям определенная часть технических средств может быть исключена из дальнейшего рассмотрения. По результатам проведенного анализа производится выбор образцов технических средств обеспечения комплексной безопасности охраняемого объекта максимально удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к системы физической защиты (рисунок).



Иерархическая схема проблемы выбора технических средств обеспечения комплексной безопасности охраняемого объекта

После проведения попарных сравнений приемлемых альтернатив составляется шкала относительной важности, в которой каждому уровню ставится в соответствие число (табл. 1) [5].

Таблица 1

Шкала относительной важности

Уровень важности	Количественное значение
Равная важность	1
Умеренное превосходство	2
Значительное (большое) превосходство	3

Далее после попарного сравнения элементов каждого уровня иерархии, используя одно из приведенных в табл. 1 определений, эксперт выражает свое мнение и заносит в матрицу сравнения соответствующее число (табл. 2).

Таблица 2

Матрица сравнений для критериев

Критерий	$К_1$	$К_2$	…	$К_N$	Собственный вектор	Вес критерия
$К_1$	1	K_1^2	…	K_1^N	Ω_1	ω_1
$К_2$	K_2^1	1	…	K_2^N	Ω_2	ω_2
…	…	…	…	…	…	…
$К_N$	K_N^1	K_N^2	…	1	Ω_N	ω_N

Вид матрицы сравнений для альтернатив приведен в табл. 3.

Таблица 3

Матрица сравнений альтернатив

Альтернатива	A	B	…	Z	Собственный вектор	Вес альтернативы по соответствующему критерию
A	1	L_A^B	…	L_A^Z	Ω_A	v_{AK_N}
B	L_B^A	1	…	L_B^Z	Ω_B	v_{BK_N}
…	…	…	…	…	…	…
Z	L_Z^A	L_Z^B	…	1	Ω_Z	v_{ZK_N}

В представленных таблицах K_i^j – значение *i*-го критерия при оптимизации по *j*-му критерию, L_i^j – важность *i*-й альтернативы относительно *j*-й альтернативы по соответствующему критерию.

Все приемлемые альтернативы сравниваются отдельно по каждому критерию, для чего сначала вычисляются собственные векторы матриц, а затем производится их нормирование:

$$\omega_i = \sum_{i=1}^{N} \Omega_i^2 , \quad (1)$$

где ω_i – вес *i*-го критерия; Ω_i – собственный вектор; N – число критериев.

Синтез полученных коэффициентов важности, а также определение для каждой альтернативы соответствующего показателя качества осуществляется по формуле:

$$V_j = \sum_{i=1}^{N} \omega_i V_{ij}, \quad (2)$$

где V_j – показатель качества *j*-й альтернативы; ω_i – вес *i*-го критерия; V_{ij} – коэффициент важности *j*-й альтернативы по *i*-му критерию.

Приведенные зависимости позволяют определить наилучшую из приемлемых альтернатив выбора технических средств обеспечения комплексной безопасности охраняемого объекта при проектировании системы физической защиты для конкретного объекта.

Таким образом, приведенная методика выбора технических средств для построения системы физической защиты позволяет выявить закономерности воздействия и оценить влияние количественных и качественных характеристик технических средств при выборе структуры системы физической защиты для конкретного объекта и осуществить более аргументированное обоснование выбора решения с использованием принципа выбора и обоснования приоритетных альтернатив. Важнейшей особенностью данной задачи является то, что в результате экспертизы несколько альтернативных вариантов построения системы физической защиты для конкретного объекта должны быть отранжированы по интегральному показателю, который с достаточной объективностью отражает абсолютное превосходство одной системы над другой при установке на фиксированном объекте.

Список литературы

1. Пушкарёв А.М., Здоровцов А.Г. Методика обоснования рациональных вариантов построения технических средств охраны // Материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции «Территориально распределенные системы охраны». Калининград: КПИ ФСБ России, 2020.

2. Астахов А.Д. Методика военно-экономического обоснования принимаемых решений. М.: ВИА, 2005. 55 с.

3. Системы физической защиты ядерно-опасных объектов. Учебное пособие / Под ред. Н.С. Погожина. М.: МИФИ, 2001. 242 с.

4. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. М.: Логос, 2007. 392 с.

5. Саати Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях. Аналитические сети. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 360 с.

Пушкарёв Александр Михайлович, канд. техн. наук, профессор, alex.pushkarev2018@yandex.ru, Россия, Пермь, Пермский военный институт войск национальной гвардии РФ,

Здоровцов Анатолий Геннадьевич, адъюнкт, zdorovtsovag@list.ru, Россия, Пермь, Пермский военный институт войск национальной гвардии РФ

TO THE ISSUE OF OPTIMAL SYNTHESIS OF PHYSICAL PROTECTION SYSTEMS

A.M. Pushkaryov, A.G. Zdorovtsov

The issue of rational selection of technical means to ensure the complex safety of the protected object is considered due to the generated set in compliance with tactical, technical and economic restrictions. Method of selection of technical means for construction of physical protection systems of an object is proposed.

Key words: physical protection system, comprehensive security, protected facility.

Pushkaryov Aleksander Mikhailovich, candidate of technical sciences, professor, alex.pushkarev2018@yandex.ru, Russia, Perm, the Perm Military Institute of the National Guard's Forces of the Russian Federation,

Zdorovtsov Anatoly Gennadevich, postgraduate, zdorovtsovag@list.ru, Russia, Perm, the Perm Military Institute of the National Guard's Forces of the Russian Federation

УДК 531.55

ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ И ПРОЕКТНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВОЗДУХОЗАБОРНЫМ УСТРОЙСТВАМ

В.В. Ветров, В.В. Морозов, А.С. Федоров, А.С. Оськин, Н.С. Чулков, П.Д. Шилин

Рассмотрены четыре конструкции воздухозаборных устройств, разработанные для внедрения прямоточного воздушно-реактивного двигателя в состав телескопически трансформируемого управляемого артиллерийского снаряда. Получены дроссельные характеристики методами вычислительной газовой динамики для предложенных вариантов воздухозаборных устройств при различных скоростях набегающего потока и проведено сравнение.

Ключевые слова: воздухозаборное устройство, трансформируемый управляемый артиллерийский снаряд, ракетно-прямоточный двигатель, дроссельная характеристика, дальность полета.

Повышение баллистической эффективности (увеличение дальности полета при неизменных ГМХ и массе полезной нагрузки) на современном этапе развития является одной из наиболее актуальных для управляемых артиллерийских снарядов (УАС). Максимальные дальности полета для неуправляемого снаряда сегодня составляют порядка 70 км [1, 2].

Одним из вариантов увеличения дальности полета является использование прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД), одним из ключевых элементов конструкции которых является воздухозаборное устройство (ВЗУ). ВЗУ играет важную роль при интеграции ПВРД в состав ЛА, специфическая компоновка при этом не позволяет использовать классические решения с носовым, либо боковым ВЗУ наиболее рациональной геометрии.

Использование РПД возможно благодаря силовому импульсу продуктов сгорания метательного заряда. Снаряд приобретает начальную (дульную) скорость для последующей его работы. Применение РПД на УАС следует считать одним из перспективных направлений для увеличения их дальности, но в данный момент применение РПД на малогабаритных ракетах затруднено [3, 4]. В наши дни известны только конструкции УАС с РДТТ.

Жесткие габаритные ограничения осложняют использование РПД в связи трудностью размещения на борту ЛА камеры дожигания необходимого удлинения [5]. На протяжении всего полета УАС имеет избыточный запас прочности планера, из-за высоких стартовых перегрузок, в то время как для реализации высокоэффективного

ПВРД, либо его разновидности, ракетно-прямоточного двигателя (РПД), необходима камера дожигания достаточного размера. Известен вариант летательного аппарата (рис. 1) активно-реактивного старта с формируемым на базе полетной трансформации ракетно-прямоточным двигателем, рассмотренный в [6], часть обечайки в котором разделена на наружную и внутреннюю. Наружная имеет возможность осевого перемещения относительно внутренней с последующей фиксацией в раскрытом положении.

Приведенные конструкции являются вариантами реализации трансформируемого УАС с РПД в габаритах штатного неуправляемого снаряда. Известен также вариант УАС с РПД с увеличением габаритов без использования полетной трансформации, рассмотренный в [7]. Это положительно влияет на простоту конструкции, а также позволяет находить более эффективные решения в области ВЗУ. Однако, расположить камеру дожигания достаточного объема невозможно. Поэтому целесообразно рассмотреть возможность реализации размещения РПД с использованием полетной трансформации на УАС увеличенных габаритов.

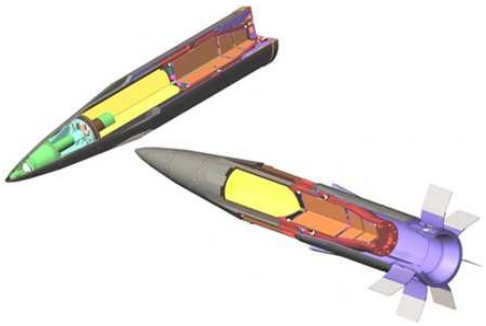


Рис. 1. УАС с РПД с телескопически трансформируемым корпусом [Патент RU 2486452]

Специфика компоновки УАС заключается в том, что при внедрении в их состав РПД особая роль отводится ВЗУ. Характеристики ВЗУ часто имеют обратно-пропорциональную зависимость, что затрудняет его исследования. Основными параметрами ВЗУ являются коэффициент восстановления полного давления, коэффициент расхода воздуха и коэффициент дополнительного аэродинамического сопротивления. Важно учесть, что увеличение коэффициента восстановления полного давления сопровождается повышением коэффициента дополнительного аэродинамического сопротивления, в то же время повышение коэффициента расхода на нерасчетных режимах может негативно сказаться на коэффициенте восстановления полного давления в области расчетных чисел Маха. Таким образом, при переменных внешних условиях полета, характерных для УАС, сложно выбрать критерий оценки эффективности ВЗУ. Целесообразно в качестве такового использовать в дальности полета. Исходя из вышеизложенного, возможно сформулировать цель проведенного исследования, которая заключалась в определении рациональной конфигурации ВЗУ трансформируемого в полете УАС увеличенного габарита с точки зрения обеспечения максимальной дальности полета.

Для достижения обозначенной цели решались следующие основные задачи:

- синтезировать ряд вариантов ВЗУ для трансформируемого УАС с РПД;
- определить характеристики ВЗУ с использованием методов вычислительной газовой динамики;
- оценить дальность полета УАС с РПД с рассматриваемыми вариантами ВЗУ;
- провести анализ полученных результатов и выделить наиболее предпочтительную конфигурацию ВЗУ.

Оценки аэродинамических характеристик ракет проводились с использованием известных инженерных методик [8]. Определение дроссельные характеристики ВЗУ осуществлялось с привлечением методов вычислительной газовой динамики на базе

осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, замкнутых стандартной *k*-ε моделью турбулентности и численно реализованных с использованием метода конечных объемов. При этом рассмотрены четыре конфигурации ВЗУ:

4-х канальный ВЗУ без слива пограничного слоя с внутренним сжатием (рис. 2, а);

4-х канальный ВЗУ без слива пограничного слоя (рис. 2, б);

6-ти канальный ВЗУ со сливом пограничного слоя (рис. 2, в);

4-х канальный ВЗУ без слива пограничного слоя с профилированным горлом (рис. 2, г).

В рамках параметрического синтеза проанализированы различные геометрические характеристики ВЗУ и оценено их влияние на дроссельные характеристики.

Поскольку по предварительным расчетам диапазон скоростей полета для участка работы РПД составляет М=2,5…1,5, а ВЗУ необходимо проектировать под конкретную скорость, в качестве характерной скорости, на которую будет рассчитано ВЗУ, выбрано средние значение числа Маха 2.

На рис. 3 – 6 приведены поля скоростей для различных противодавлений со стороны камеры дожигания. На режимах от «зуда» до помпажа виден ярко выраженный пограничный слой в области внешнего сжатия.

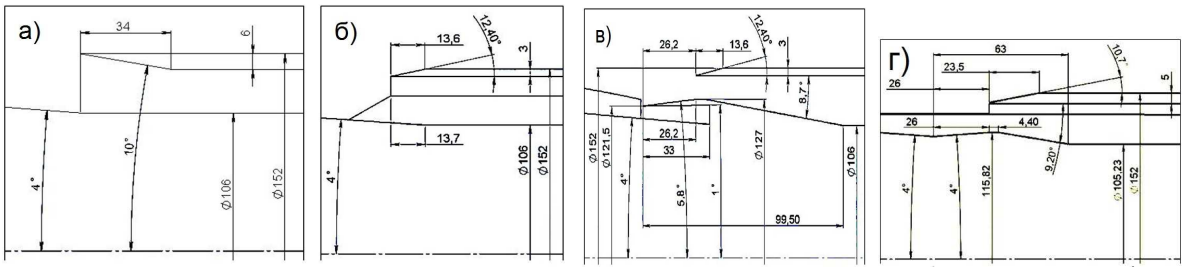


Рис. 2. Основные геометрические параметры вариантов ВЗУ со сливом пограничного слоя и без него: а - 4-х канальный ВЗУ без слива пограничного слоя с внутренним сжатием; б - 4-х канальный ВЗУ без слива пограничного слоя; в - 6-ти канальный ВЗУ со сливом пограничного слоя; г - 4-х канальный ВЗУ без слива пограничного слоя с профилированным горлом

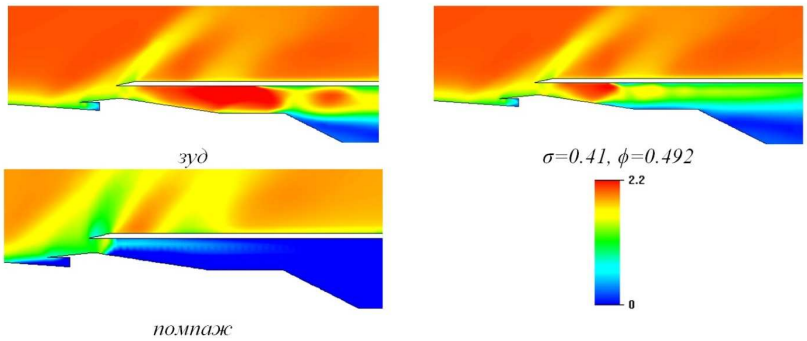


Рис. 3. Поля скоростей для 6-ти канального ВЗУ со сливом пограничного слоя при различных противодавлениях со стороны камеры дожигания и скорости невозмущенного потока M_∞=2

Как следует из рис. 3-6, структура течения во всех вариантах ВЗУ без слива пограничного слоя менее четкая, скачки уплотнения в большей степени размыты, ярко выражен пограничный слой в области внешнего сжатия.

Как видно из графиков дроссельных характеристик (рис. 7), представленных вариантов конструкций ВЗУ, наилучшими параметрами обладает вариант 4-х канального ВЗУ без слива пограничного слоя с профилированным горлом. Данный вариант име-

ет более высокие значения коэффициента расхода воздуха при сохранении допустимых значений коэффициента восстановления давления, что в свою очередь оказывает влияние на дальность полета.

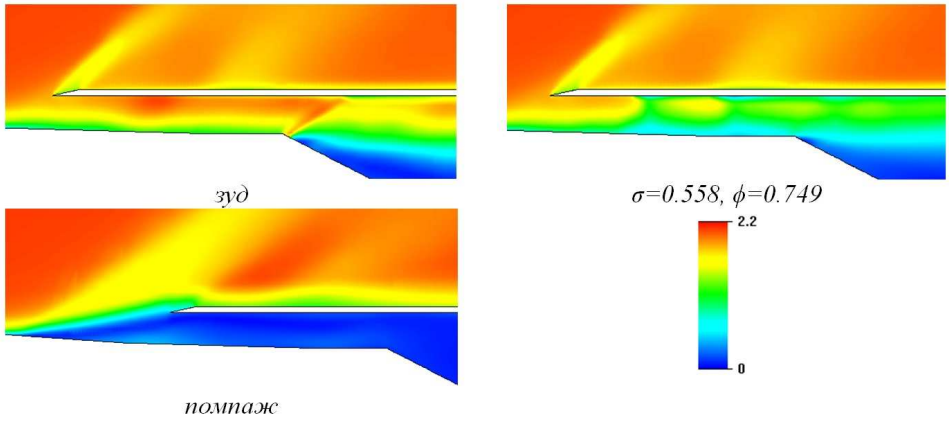


Рис. 4. Поля скоростей в 4-х канальном не профилированном ВЗУ без слива пограничного слоя при различных противодавлениях со стороны камеры дожигания и скорости невозмущенного потока M_∞=2

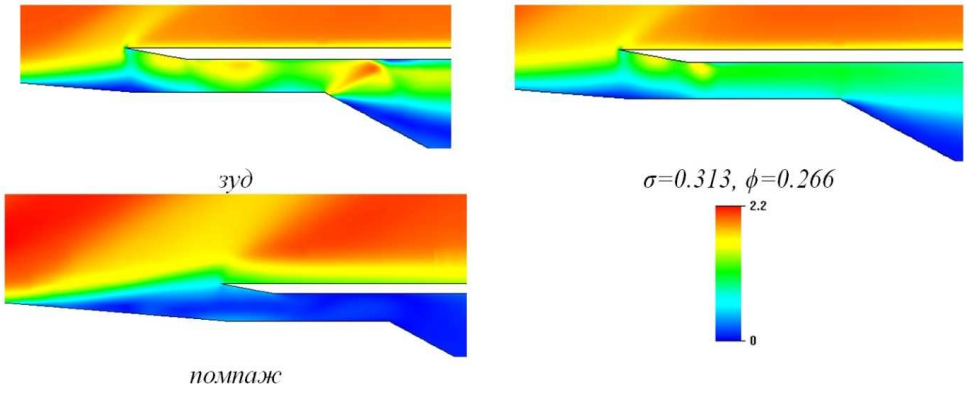


Рис. 5. Поля скоростей в 4-х канальном ВЗУ без слива пограничного слоя с внутренним сжатием при различных противодавлениях со стороны камеры дожигания и скорости невозмущенного потока M_∞=2

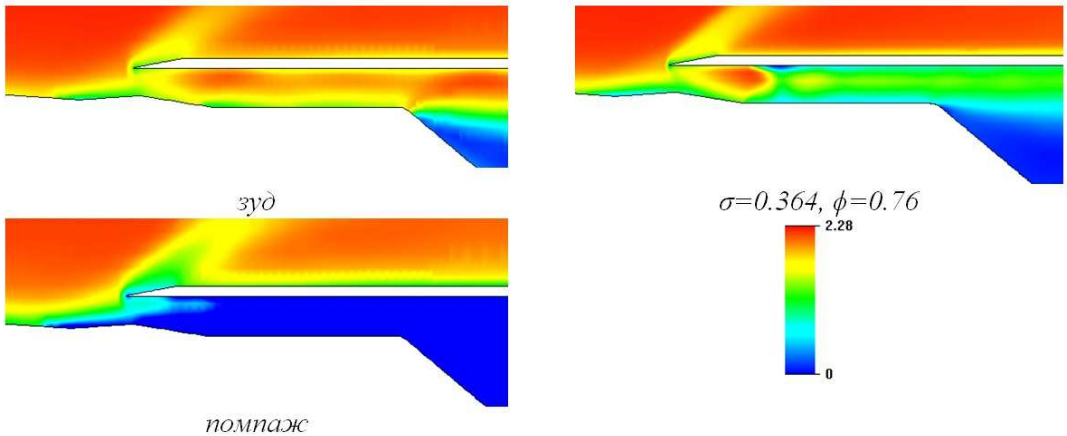


Рис. 6. Поля скоростей в 4-х канальном ВЗУ без слива пограничного слоя с профилированным горлом при различных противодавлениях со стороны камеры дожигания и скорости невозмущенного потока M_∞=2

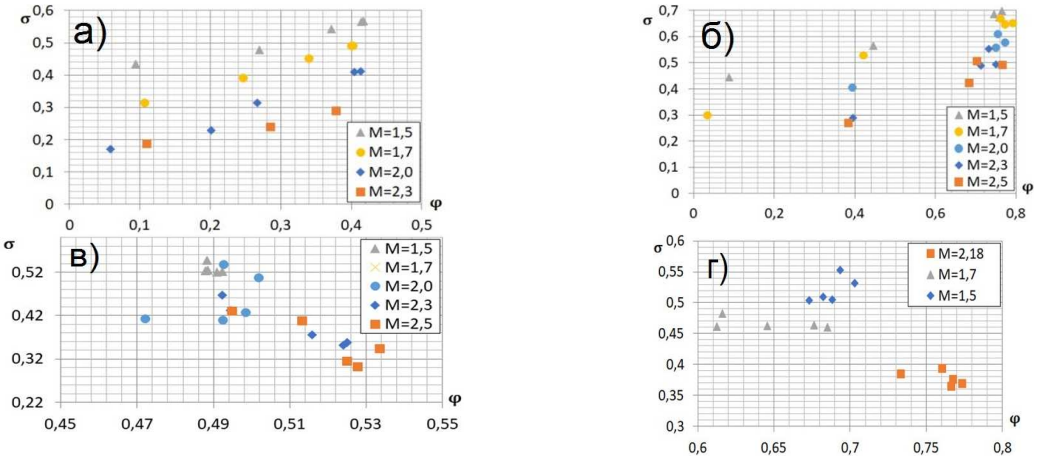


Рис. 7. Дроссельные характеристики для рассмотренных вариантов ВЗУ: а - 4-х канальный ВЗУ без слива пограничного слоя с внутренним сжатием; б - 4-х канальный ВЗУ без слива пограничного слоя; в - 6-ти канальный ВЗУ со сливом пограничного слоя; г - 4-х канальный ВЗУ без слива пограничного слоя с профилированным горлом

В варианте со сливом пограничного слоя при работе на нерасчетном режиме в области сжатия образуется застойная зона, которая оказывает негативное влияние на систему скачков в области сжатия. В то время как 4-х канальное ВЗУ без слива пограничного слоя с профилированным горлом забирает весь приходящий поток и имеет четко выраженную вертикальную ветвь, чем аналогичный ВЗУ без профилированного горла, что способствует более стабильной работе воздухозаборника. Однако в ВЗУ с внутренним сжатием перед входом образуется застойная зона, которая препятствует проходу всего потока в канал заборника, что отрицательно сказывается на коэффициентах восстановления давления и расхода воздуха. В связи с этим представляется целесообразным сосредоточить внимание именно на конструкции 4-х канального ВЗУ без слива пограничного слоя с профилированным горлом.

Список литературы

1. Электронный информационный ресурс Army Guide [Электронный ресурс] URL: http://www.army-guide.com/rus/ (дата обращения: 10.02.2020).

2. Бабичев В.И., Ветров В.В., Елесин В.П., Коликов А.А., Костяной Е.М., Способы повышения баллистической эффективности артиллерийских управляемых снарядов // Известия РАРАН. Вып. №65, 2010. С. 3-9.

3. Смирнов В.Е., Темляков О.И., Основные направления развития артиллерийских высокоточных боеприпасов автономного применения // Оборонная техника, 2003. N1-2. С. 20–29.

4. Ветров В.В., Морозов В.В., Клевенков Б.З., Основные направления повышения энергобаллистической эффективности управляемых артиллерийских снарядов // Известия РАРАН, 2010. Выпуск №65. С. 33-39.

5. Костяной Е.М., Повышение баллистической эффективности летательных аппаратов путем оптимизации их конструктивных параметров // Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск №45. 15 с.

6. Дикшев А.И., Костяной Е.М., Летательный аппарат активного старта с формируемым на базе полетной трансформации ракетно-прямоточным двигателем // Современные проблемы науки и образования, 2013. Выпуск №4. С. 55-60.

7. Оськин А.С. Анализ характеристик воздухозаборных устройств кормового расположения, выполненных в габаритах ЛА // Наука будущего – наука молодых: Сб. тезисов III Всероссийского научного форума. Нижний Новгород: Инконсалт. К, 2017. Т.1. С. 220–225.

8. Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. М.: Государственное научно-техническое издательство ОБОРОНГИЗ, 1962. 549 с.

Ветров Вячеслав Васильеви, д-р техн. наук, профессор, benzema1992@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Морозов Виктор Викторович, канд. техн. наук, доцент, benzema1992@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Чулков Никита Сергеевич, инженер-конструктор, 2 категория, benzema1992@mail.ru, Россия, Тула, АО «КБП»,

Шилин Павел Дмитриевич, инженер-конструктор, 2 категория, shilinpavel1994@mail.ru, Россия, Тула, АО «КБП»,

Оськин Артем Сергеевич, инженер-конструктор, 1 категория, OAS2009@bk.ru, Россия, Тула, АО «КБП»,

Федоров Алексей Сергеевич, инженер-конструктор, 1 категория, Merck71_93@mail.ru, Россия, Тула, АО «КБП»

BASIC DESIGN AND DESIGN AND FUNCTIONAL REQUIREMENTS FOR AIR INTAKE DEVICES

V.V. Vetrov, V.V. Morozov, A.S. Fedorov, A.S. Oskin, N.S. Chulkov, P.D. Shilin

Four designs of air intake devices developed for the introduction of a ramjet engine into a telescopically transformable guided artillery shell are considered. Throttle characteristics are obtained by computational gas dynamics methods for the proposed variants of air intake devices at different speeds of the incoming flow and a comparison is made.

Key words: air intake device, transformable guided artillery shell, ramjet engine, throttle response, flight range.

Vetrov Viacheslav Vasilievich, doctor of technical sciences, professor, benzema1992@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Morozov Viktor Viktorovich, candidate of technical sciences, docent, benzema1992@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Chulkov Nikita Sergeevich, design engineer, category 2, benzema1992@mail.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Shilin Pavel Dmitrievich, design engineer, category 2, shilinpavel1994@mail.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Oskin Artem Sergeevich, design engineer, category 1, OAS2009@bk.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Fedorov Aleksey Sergeevich, design engineer, category 1, Merck71_93@mail.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»

УДК 623-1/-8

СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ГАШЕНИЯ ЗВУКА ВЫСТРЕЛА

В.К. Зеленко, А.И. Нестеренко

В настоящее время одной из актуальных задач, которая ставится перед учеными и конструкторами-оружейниками в области стрелково-пушечного вооружения, является разработка новых способов снижения уровня звука выстрела огнестрельного оружия. В данной статье рассмотрены системы активного гашения звука выстрела, их принцип работы и преимущества этих систем.

Ключевые слова: глушитель, звук выстрела, системы активного гашения, огнестрельное оружие.

При стрельбе из огнестрельного оружия в окружающем пространстве распространяется дульная ударная волна, которая оказывает вредное механическое воздействие на стрелка и на объекты, находящиеся вблизи оружия. Эта ударная волна генерирует высокоимпульсный шум, который воспринимается как звук выстрела.

Он образуется в результате взаимодействия воздуха атмосферы с передним фронтом порохового газа, истекающего из канала ствола оружия со сверхзвуковой скоростью [1].

В ряде случаев применения огнестрельного оружия, уменьшение звука выстрела является крайне необходимым условием, так как оно демаскирует стрелка, затрудняет голосовую связь на поле боя. Так же нужно учитывать, что ведущие производители мира создают и совершенствуют широкий спектр акустических устройств, которые позволяют определить место расположения источников звука выстрелов.

Поэтому большое количество образцов ручного огнестрельного оружия имеют варианты конструкций, обеспечивающие малошумную стрельбу. Это достигается за счет применения приборов снижения уровня звука выстрела, (так же известные как глушители дульной волны) непосредственно закрепляемые на дульной части ствола (рис. 1) или интегрированные в конструкцию огнестрельного оружия (рис. 2).



Рис. 1. Внешний вид автомата 9А-91 с надульным глушителем



Рис. 2. Внешний вид АС «Вал» с интегрированным глушителем

В настоящее время существующие конструкции глушителей звука выстрела, имеют ряд существенных недостатков [1, 2], поэтому, перед учеными и конструкторами-оружейниками стоит задача разработки новых способов снижения уровня звука выстрела, которые будут лишены этих недостатков.

Одно из возможных направлений - это применение в конструкции огнестрельного оружия систем активного гашения звука выстрела.

Суть этой системы – уменьшение амплитуды звукового давления, достигаемое в результате интерференции двух или большего числа волновых процессов, при котором результирующая амплитуда распространяющейся звуковой волны в точке наблюдения уменьшена благодаря соответствующему подбору фаз суммированных колебаний [3]. Под активными методами гашения исходного звукового поля, понимается компенсация, при которой вторичное компенсирующее поле создается специальным излучателе, в отличие от пассивных методов, для реализации которых такие излучатели, а также дополнительная энергия, не требуется.

На рис. 3 представлена простейшая функциональная схема активного гашения звука.

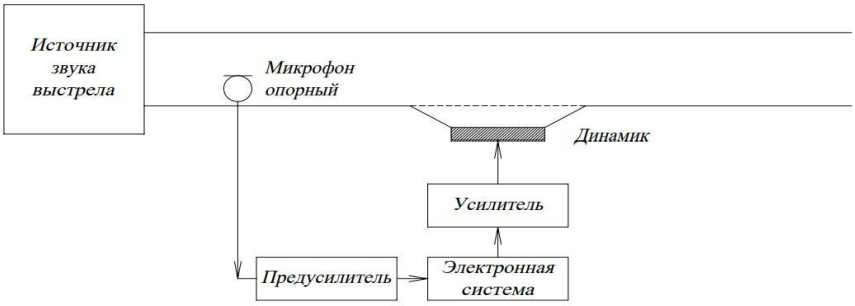


Рис. 3. Функциональная схема системы активного гашения звука выстрела

Принцип её работы заключается в следующем: опорный микрофон, установленный возле источника звука выстрела, определяет уровень звука и подает пропорциональный входной сигнал электронной системе, которая его обрабатывает (инвертирует) и передает его возбудителю сигнала (динамику). В свою очередь он генерирует звуковую волну, которая сдвинута по фазе на 180° относительно фазы источника звука выстрела. В процессе деструктивной интерференции звуковых волн, происходит взаимное уменьшение результирующей амплитуды звуковых колебаний.

Недостатком такой системы является то, что волна от возбудителя сигнала воздействует не только на высокоимпульсный шум, который воспринимается как звук выстрела, но и на опорный микрофон, в результате чего происходит искажение генерируемой звуковой волны.

Этот недостаток устраняется в адаптивной системе активного гашения (АСАГ) звука выстрела (рис. 4). Принцип работы такой же, как в системах активного гашения, но в конструкции АСАГ, чтобы компенсировать искажения генерируемой звуковой волны, используется микрофон ошибки. Он устанавливается за динамиком и регистрирует результат суперпозиции звуковых волн, после чего происходит корректировка генерируемой звуковой волны.

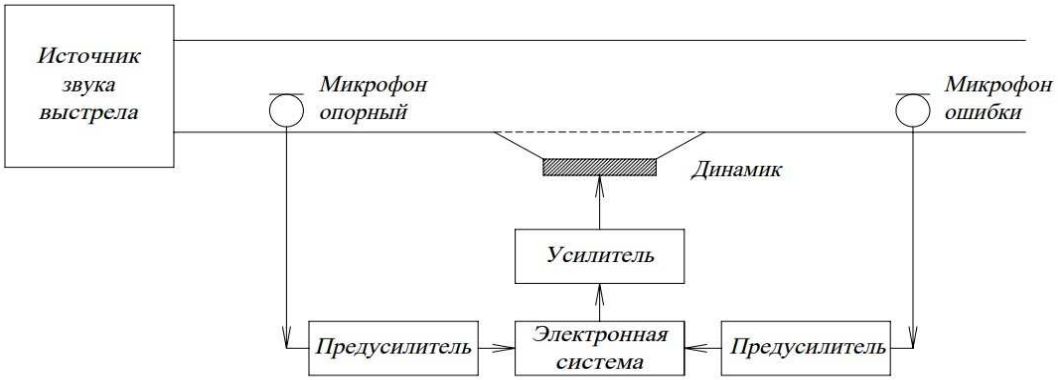


Рис. 4. Функциональная схема адаптивной системы активного гашения звука выстрела

На эффективность адаптивной системы активного гашения влияют различные помехи и изменения параметров элементов системы. Снизить влияние помех и в отдельных случаях повысить эффективность системы удается посредством увеличения количества микрофонов и динамиков (рис. 5).

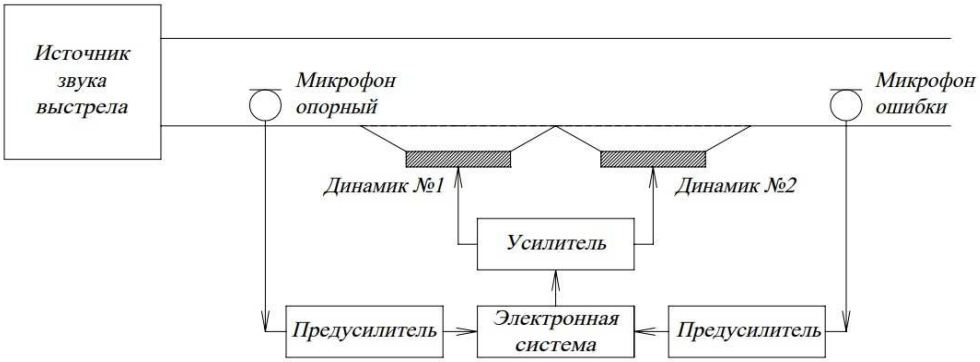


Рис. 5. Функциональная схема адаптивной системы активного гашения звука выстрела с двумя вторичными источник

Применение систем активного гашения звука выстрела в конструкции огнестрельного оружия позволит получить ряд преимуществ по отношению к классическим приборам снижения уровня звука выстрела:

– возможность использования одной и той же системы для различных видов огнестрельного оружия, за счет регулирования амплитудно-частотных характеристик генерируемой звуковой волны на программном уровне;

– адаптация системы к внешним условиям эксплуатации, что позволит получить стабильное значение снижения уровня звука выстрела;

– гашение низкочастотных колебаний звуковой волны без увеличения габаритов самой системы.

Данное направление является новым в области стрелково-пушечного вооружения, которое требует тщательных теоретических исследований и проведение многочисленных натурных экспериментов.

Список литературы

1. Платонов Ю. П. Термогазодинамика автоматического оружия. Гос. унитарное предприятие «Конструкторское бюро приборостроения», Фил. «ЦКИБ СОО». М.: Машиностроение, 2009. 355 с.

2. Коновалов Н.А. Ручное огнестрельное оружие бесшумного боя. Приборы снижения уровня звука выстрела для автоматов. Проектирование и экспериментальная отработка / Коновалов Н.А., Пилипенко О.В., Скорик А.Д. [и др.]. Днепропетровск: Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины, 2008. 303 с.

3. Гусев В.П., Солодова М.А. Активные методы компенсации звукового поля и их возможности при реализации в воздушных каналах систем вентиляции // Вестник МГСУ. 2011. С. 39 – 47.

4. Ардашев А.Н., Федосеев С.Л. Оружие специальное, необычное, экзотическое. М.: АСТ. Астрель. 2001. 320 с.

Зеленко Виктор Кириллович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, shura.nesterenko.94@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Нестеренко Александр Игоревич, аспирант, shura.nesterenko.94@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

SYSTEMS FOR ACTIVE SUPPRESSION OF THE SOUND OF A SHOT

V.K. Zelenko, A.I. Nesterenko

Currently, one of the urgent tasks that is set for scientists and designers-gunsmiths in the field of small arms and cannon weapons is to develop new ways to reduce the sound level of firearms. This article discusses the systems of active silencing of the sound of a shot, their principle of operation and the advantages of these systems in comparison with modern designs of silencers of the sound of a shot.

Key words: suppressor, the sound of a gunshot, active noise cancellation systems, firearms.

Zelenko Victor Kirillovichdoctor, of technical science, professor, manager of department, shura.nesterenko.94@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Nesterenko Alexander Igorevich, postgraduate, shura.nesterenko.94@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 681.518.3

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Е.И. Минаков, Е.О. Мешкова

Рассмотрены принципы построения горной выработки. Произведен анализ систем транспортного обеспечения горной выработки. Рассмотрены технологии, на базе которых можно построить измерительно-управляющую систему, позволяющую обеспечить управление карьерной техникой в условиях плохой видимости.

Ключевые слова: карьер, радиолокация, RFID – метки, экскаватор, gps-приемник.

Карьер — совокупность горных выработок, образованных при добыче полезного ископаемого открытым способом. Принцип открытой разработки заключается в том, что расположенные сверху более мощные слои пустых пород, покрывающих полезное ископаемое, в пределах горного отвода разделяется на горизонтальные слои — уступы, которые вынимают последовательно в направлении сверху вниз с опережением нижних слоев верхними. Высота уступа зависит от прочности пород и применяемой техники и колеблется от нескольких метров до нескольких десятков метров. Открытая разработка полезных ископаемых является более прогрессивным способом добычи по сравнению с подземной добычей в шахтах, так как рабочее пространство не ограничено. В результате создаются благоприятные условия для применения мощных, высокопроизводительных машин, производственный процесс высокомеханизированный и выполняется почти без ручных работ. Как следствие производительность труда в 3-6 раз большая, чем в шахтах. Благодаря широкому развитию фронта работ необходим меньший период на строительство открытых разработок, быстрее осваиваются проектные мощности.

Карьер представляет собой систему уступов (как правило, верхние — породные или вскрышные, нижние — добычные), которые постоянно подвигаются, обеспечивая выемку горной массы в контурах карьерного поля. Схема уступа приведена на рис. 1.

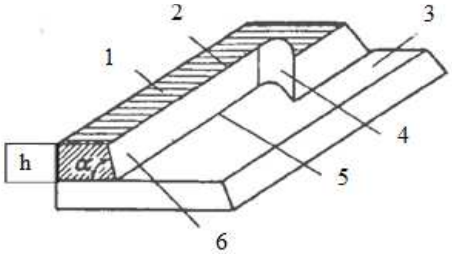


Рис. 1. Основные элементы уступа: 1 – верхняя площадка уступа; 2 – верхняя бровка уступа; 3 – нижняя площадка уступа; 4 – забой уступа; 5 – нижняя бровка уступа; 6 – откос уступа; h – высота уступа; α – угол откоса уступа

Основным механическим средством при проведении вскрышных и очистных работ является экскаватор – самоходная землеройная машина, которая выполняет выемку породы и ее перемещение в ковше. Экскаваторы бывают одноковшовыми и многоковшовыми. Применяются также драглайны – канатно-ковшовые экскаваторы. Они отличаются от одноковшовых экскаваторов тем, что ковш со стрелой соединен тросом. Драглайны бывают шагающими и на гусеничном ходу. Кроме экскаваторов, на открытых разработках применяются скреперы, бульдозеры, буровзрывная техника и другие машины, которые имеют вспомогательное назначение. На карьерах наибольший объем перевозок осуществляется тяжелыми автосамосвалами. Карьерные автосамосвалы грузоподъемностью 100…155 т — распространенное средство транспорта. Благодаря их маневренности и мощности они способны преодолевать крутые склоны. Эксплуатируются и 200…300-тонные самосвалы. Для транспортировки горной массы из карьера применяют железнодорожные тяговые агрегаты сцепной массой 360 т, думпкары грузоподъемностью до 180 т. Применяют самоходные карьерные дробилки на гусеничном, колесном и шагающе-рельсовом ходу с массой до 600 т и производительностью 5 тыс. т в год.

Однако автотранспорт при транспортировании горной массы поднимает большое количество пыли. Автомобильные дороги на карьерах занимают одно из первых мест в балансе пылевыделения по всем источникам выделения пыли в карьере. На их долю приходится 70…90 % всей выделяемой пыли.

В связи с этим возникает необходимость создания информационных систем, позволяющих обеспечить управление карьерной техники в условиях плохой видимости. Создаваемая система должна решать следующие задачи:

предотвращать столкновения транспортных средств, движущихся друг за другом;

предотвращать съезд транспортного средства в обрыв и столкновения со скалой.

Информационную систему помощи водителям в условиях плохой видимости можно построить на базе следующих технологий:

спутниковые системы позиционирования (gps/глонасс);

RFID – метки;

радиолокационные системы.

Система на основе спутниковых систем навигации. В этом случае на каждом транспортном средстве установлен gps-приемник [1]. Все транспортные средства соединены в единую сеть. С помощью gps-приемника определяется координаты каждого транспортного средства в карьере и передаются по сети от одной машины к другой. Таким образом, водитель знает положение как своей машины, так и остальных. Это позволяет избежать столкновений машин друг с другом. Использование карты дорог в карьере позволяет предотвратить съезд машины с дороги. Преимуществом метода является относительная простота реализации. Недостатком является низкая точность определения местоположения в условиях плохой видимости.

Система на основе RFID – меток. RFID (Radio Frequency IDentification) — способ автоматической идентификации объектов, в котором посредством радиосигналов считываются или записываются данные, хранящиеся в так называемых транспондерах, или RFID-метках [2]. Любая RFID-система состоит из считывающего устройства (считыватель) и транспондера (RFID-метка). По дальности считывания RFID-системы можно подразделить на системы:

ближней идентификации (считывание производится на расстоянии до 20 см);

идентификации средней дальности (от 20 см до 5 м);

дальней идентификации (от 5 м до 300 м).

По типу источника питания RFID-метки делятся на:

пассивные, не имеют встроенного источника энергии, электрический ток, индуцированный в антенне электромагнитным сигналом от считывателя, обеспечивает достаточную мощность для функционирования и передачи ответного сигнала, считываются на близком расстоянии;

активные, обладают собственным источником питания и не зависят от энергии считывателя, вследствие чего они читаются на дальнем расстоянии, имеют большие размеры и могут быть оснащены дополнительной электроникой;

полупассивные, очень похожи на пассивные метки, но оснащены батареей, которая обеспечивает чип энергопитанием, при этом дальность действия этих меток зависит только от чувствительности приёмника считывателя и они могут функционировать на большем расстоянии и с лучшими характеристиками.

Для системы на основе RFID – меток необходимо расположить вдоль пути следования транспортных средств RFID – метки. Так же на автомобилях будет установлен RFID – считыватель. Данные о местоположении RFID – меток заносятся в бортовой компьютер каждого автомобиля. Двигаясь по дороге и проезжая мимо установленной RFID – метки бортовой компьютер автомобиля получит сигнал от данной RFID – метки и сопоставит его с положением данной метки, по задержке сигнала от метки определит положение автомобиля. Для определения положения автомобиля RFID – считыватель должен получить сигнал минимум от двух RFID – меток, стоящих на одной стороне дороги. Недостатком является необходимость установки RFID – меток на пути следования.

Радиолокационная система. Использует метод радиолокации, основанный на излучении радиоволн и регистрации их отражений от объектов [3]. Выделяют два вида радиолокации:

пассивная радиолокация, основана на приёме собственного излучения объекта;

активная радиолокация, радар излучает свой собственный зондирующий сигнал и принимает его отражённым от цели. В зависимости от параметров принятого сигнала определяются характеристики цели.

Активная радиолокация бывает двух видов:

с активным ответом — на объекте предполагается наличие радиопередатчика, который излучает радиоволны в ответ на принятый сигнал;

с пассивным ответом — запросный сигнал отражается от объекта и воспринимается в пункте приёма как ответный.

Радиолокационные системы различаются по используемому диапазону радиоволн, по виду зондирующего сигнала, числу применяемых каналов, числу и виду измеряемых координат, месту установки. Максимальная дальность действия зависит от характеристик антенной системы, мощности излучаемого сигнала, чувствительности приёмника.

В данном случае будет применяться активная радиолокация с пассивным ответом. В этом случае на автомобиль необходимо установить радиолокационную систему, которая будет включать в себя 3 антенны. Одна антенна установлена спереди и измеряет расстояние до впереди идущего автомобиля. Две другие установлены в углах автомобиля и излучают сигнал под углом 45 градусов по направлению движения. Сигнал от

одной антенны будет отражаться от скалы, сигнал от второй антенны будет отражаться от предохранительного вала. Таким образом, две боковые антенны будут предотвращать выезд автомобиля за пределы дороги. Схема радиолокационной системы приведена на рис. 2.

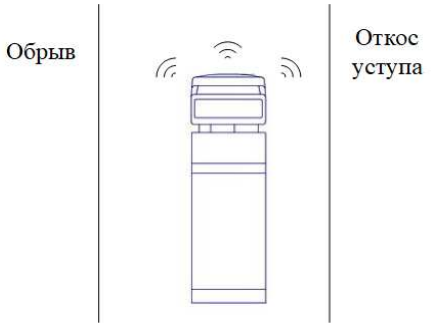


Рис. 2. Радиолокационная система

Таким образом, приемлемым вариантом информационной системы предотвращения столкновений карьерной техники в условиях плохой видимости являются системы на основе RFID – меток и радиолокационных систем. Они лишены недостатков систем на основе спутникового позиционирования, таких как низкая точность в условиях плохой видимости, но при этом они требуют установки дополнительного оборудования.

Список литературы

1. Серапинас Б.Б. Глобальные системы позиционирования. М.: ИКФ «Каталог», 2002. 106 с.

2. Daniel M. Dobkin. The RF in RFID: UHF RFID in Practice, 2nd edition. Newnes, 2012. 540 с.

3. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов. М.: Радиотехника, 2004. 320 с.

Минаков Евгений Иванович, д-р техн. наук, профессор, eminakov@bk.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Мешкова Елена Олеговна, аспирант, emeshkova16@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYSIS OF METHODS FOR CONSTRUCTING INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS OF VEHICLES IN MINE WORKINGS

E.I. Minakov, E.O. Meshkova

The principles of construction of mine workings are considered. The analysis of the systems of transport support for mining is carried out. The technologies are considered, on the basis of which it is possible to build a measuring and control system that makes it possible to ensure the management of quarry equipment in conditions of poor visibility.

Key words: quarry, radar, RFID tags, excavator, gps receiver.

Minakov Evgeny Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, eminakov@bk.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Meshkova Elena Olegovna, postgraduate, emeshkova16@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.932; 53.08

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

С.Л. Погорельский, В.М. Понятский, Е.А. Макарецкий,
А.С. Гублин, А.В. Овчинников

В статье рассматривается реализация программного комплекса формирования и обработки гиперспектральных изображения, представлена структура комплекса и алгоритм его работы. Представлены примеры представления результатов обработки экспериментальных данных.

Ключевые слова: программный комплекс, гиперспектральная обработка, компьютерное моделирование.

На сегодняшний день существуют различные алгоритмы и программные комплексы обработки изображений, решающие задачу идентификации цели на сложном фоне, однако большинство из них оперируют с одним, либо небольшим набором каналов видеоинформации [1]. В свою очередь, использование гиперспектральных изображений позволяет значительно повысить локальный контраст сцены, но для этого требуется разработка, исследование и внедрение новых алгоритмов комплексирования изображений[2]. В рамках выполнения научно-исследовательской работы был разработан программный комплекс гиперспектральной обработки изображений, обеспечивающий полное методическое и вычислительное сопровождение проводимых исследований.

Разработанный программный комплекс реализован с использованием среды Matlab, что позволило сократить время его разработки за счет использования специализированных функций. Структурная схема программного комплекса обработки гиперспектральных изображений представлена на рис. 1.

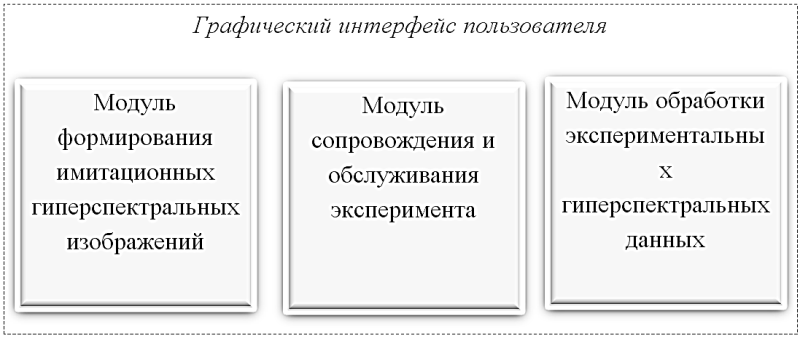


Рис. 1. Структурная схема программного комплекса обработки гиперспектральных изображений

Разработанный программный комплекс состоит из следующих частей:

- модуль имитации;
- модуль сопровождения эксперимента;
- модуль обработки экспериментальных данных.

Каждый из модулей реализованный в программном комплексе является независимым и может выполнять свои функции без привлечения функционала смежных модулей. С позиции графического интерфейса, модули реализованы на отдельных вкладках экранной формы, представленной на рис. 2.

Переключение между модулями осуществляется путем выбора требуемой вкладки в верхней левой части программного комплекса.

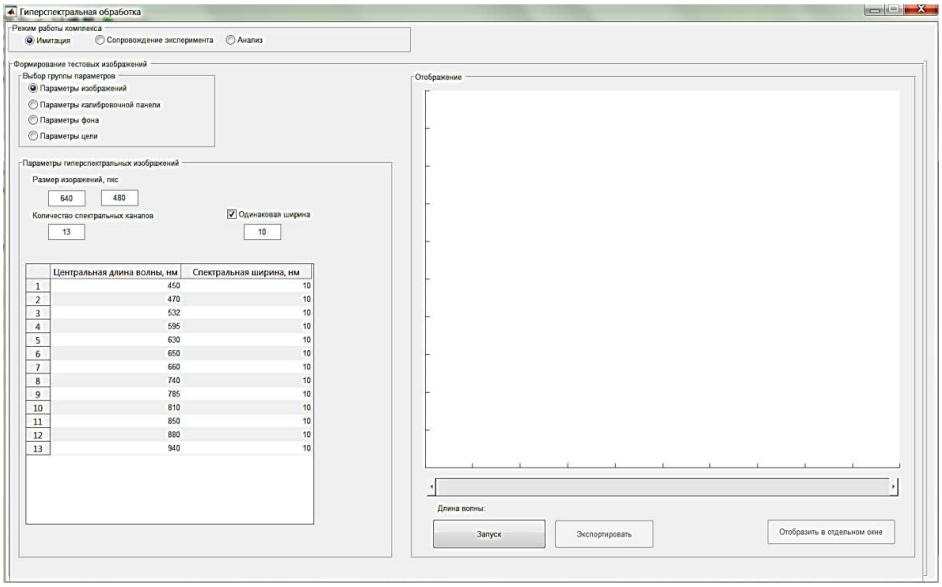


Рис. 2. Экранная форма программного комплекса гиперспектральной обработки

1. Модуль формирования тестовых гиперспектральных изображений. Для полноценного исследования новых и модифицированных алгоритмов необходимо формировать тестовые гиперспетральные изображения с заранее известными пространственными и спектральными характеристиками цели и фона, причем формат хранения гиперспектральных данных должен быть совместим с программным комплексом, в котором в дальнейшем будет производиться обработка гиперспектральных изображений. Доступ к модулю производится путем выбора вкладки «Имитация». Работа модуля соответствует алгоритму, представленному на рис. 3.

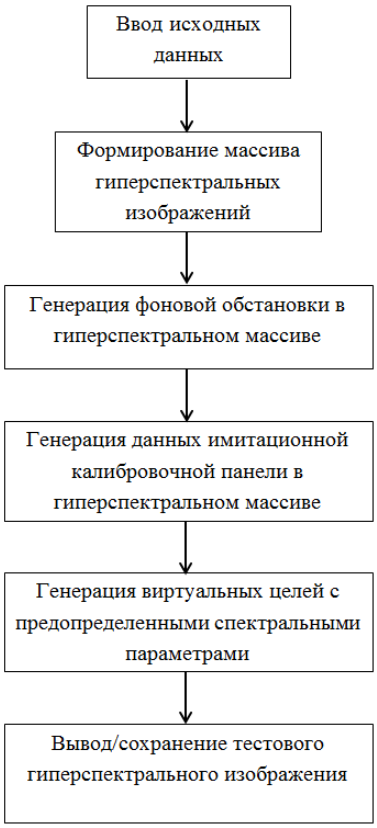


Рис. 3. Алгоритм формирования тестовых гиперспектральных изображений

Пример сгенерированной гиперспектральной серии изображений представлен на рис. 4.

В левом верхнем углу расположена калибровочная панель, в центральной области – целевой объект с линейным распределением интенсивности. При необходимости дальнейшей обработки и сохранения гиперспектральной серии реализована функция «Экспорт».

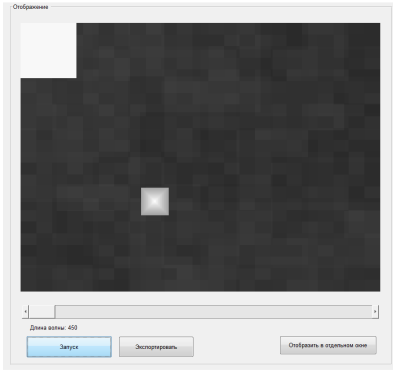


Рис. 4. Пример тестовой гиперспектральной серии изображений

2. Модуль сопровождения эксперимента. Модуль сопровождения эксперимента предназначен для обеспечения единства методики проведения эксперимента на измерительном гиперспектральном комплексе технического зрения, выявления изображений, характеристики которых не удовлетворяют требуемым (например, наличие насыщения в областях интереса и прочее), ведения и обслуживания единой базы данных по проведенным экспериментам.

Важно указать, что на первоначальном этапе загрузки экспериментальных данных в области просмотра модуля сопровождения эксперимента отображается серия, планируемая к загрузке, что показано на рис. 5.

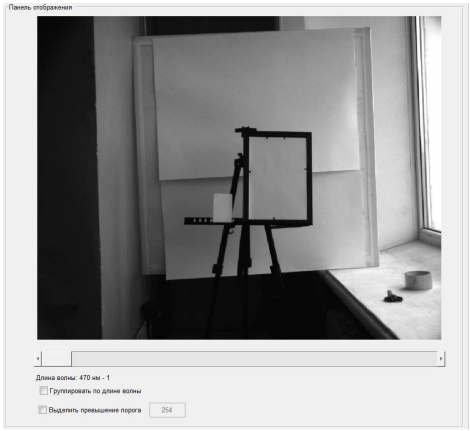


Рис. 5. Экранная форма панели просмотра в модуле сопровождения эксперимента

Из особенностей реализации панели просмотра следует отметить, что пользователю доступно:

- переключение между каналами путем перемещения слайдера (длина волны отображенного канала указана ниже ползунка, числовое значение после длины волны указывает на номер серии);
- группировка просматриваемых изображений по длине волны (функция актуальны в случае, когда загружается эксперимент, состоящий из нескольких серий);
- подсвечивание областей, интенсивность которых превышает указанный пользователем пороговый уровень.

3. Модуль анализа эксперимента. Модуль анализа эксперимента предназначен для автоматизации расчетов числовых параметров, выбора наилучших канальных изображений по заданному критерию, при работе с несколькими сериями, а также графической визуализации полученных результатов. Внешний вид экранной формы модуля анализа экспериментов представлен на рис. 6.

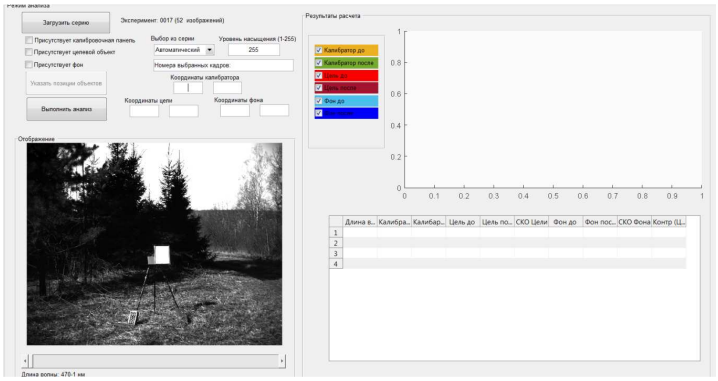


Рис. 6. Экранная форма модуля анализа экспериментов

Технически модуль анализа эксперимента состоит из следующих частей:

- панель подготовки и настройки режима анализа;
- область отображения гиперспектральных изображений рассматриваемого эксперимента;
- область графической интерпретации результатов, с возможностью вывода требуемых графиков;
- область числового отображения результатов.

Обобщенный алгоритм, работы модуля анализа эксперимента приведен на рис. 7.

Результаты анализа выводятся в графической форме в виде спектральных кривых, названия которых отображаются слева от графиков. Также пользователю доступно отключение по отдельности каждой из спектральных зависимостей. Пример графического отображения результатов приведен на рис. 8.

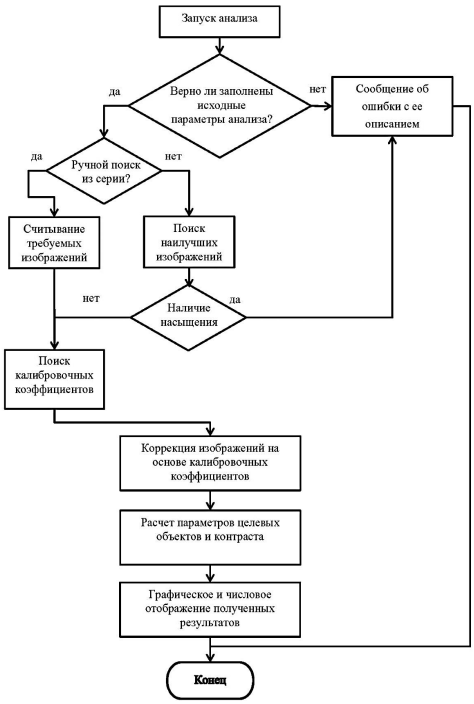


Рис. 7. Обобщенный алгоритм работы модуля анализа эксперимента

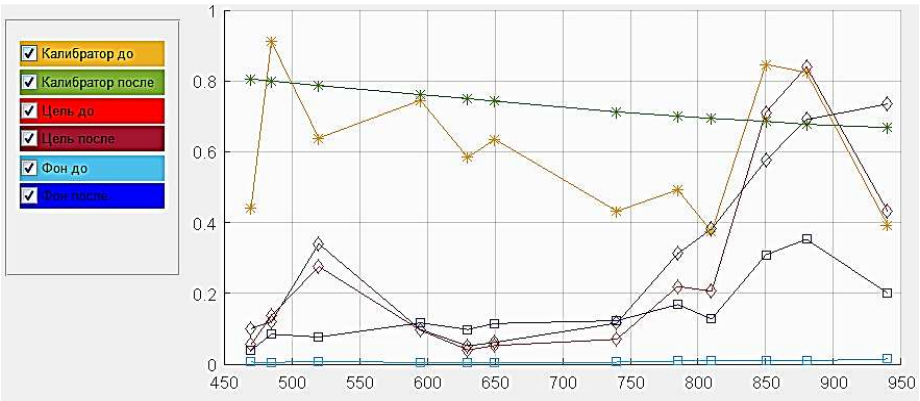


Рис. 8. Графическое отображение результата анализа гиперспектральных изображений

Числовое отображение результатов моделирование представлено в виде таблицы, которая представлена на рис. 9.

	Длина в...	Калибра...	Калибар...	Цель до	Цель по...	СКО Цели	Фон до	Фон пос...	СКО Фона	Контр (Ц...
1	470	0.4416	0.8053	0.0552	0.1006	0.0059	0.0389	0.0709	0.0309	0.1727
2	485	0.9109	0.8000	0.1366	0.1199	0.0047	0.0846	0.0743	0.0316	0.2350
3	520	0.6386	0.7868	0.2758	0.3399	0.0084	0.0764	0.0941	0.0392	0.5664
4	595	0.7455	0.7613	0.0957	0.0977	0.0042	0.1165	0.1189	0.0485	0.0979
5	630	0.5839	0.7504	0.0401	0.0515	0.0037	0.0979	0.1259	0.0518	0.4189
6	650	0.6356	0.7429	0.0525	0.0614	0.0041	0.1148	0.1342	0.0537	0.3725
7	740	0.4323	0.7127	0.0702	0.1158	0.0058	0.1228	0.2024	0.0663	0.2722
8	785	0.4921	0.7006	0.2194	0.3123	0.0089	0.1683	0.2396	0.0732	0.1318
9	810	0.3742	0.6943	0.2059	0.3819	0.0098	0.1273	0.2362	0.0710	0.2357
10	850	0.8468	0.6859	0.7109	0.5758	0.0088	0.3087	0.2501	0.0691	0.3944
11	880	0.8239	0.6775	0.8400	0.6908	0.0097	0.3528	0.2901	0.0749	0.4085
12	940	0.3924	0.6683	0.4317	0.7352	0.0146	0.2004	0.3413	0.0752	0.3659

Рис. 9. Числовое отображение результата анализа гиперспектральных изображений

Следует отметить что данные, представленные в таблице на рис. 9, доступны для выделения и копирования, вследствие чего они без труда могут быть перенесены в удобный пользователю редактор.

Список литературы

1. Погорельский С.Л., Понятский В.М., Макарецкий Е.А., Гублин А.С., Овчинников А.В. Повышение точности измерения параметров объектов на изображениях на основе алгоритмического комплексирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 12. Ч. 2. С. 147-154.

2. Макарецкий Е.А., Гублин А.С. Комплексирование информации нескольких измерительных каналов методами многозначной логики // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: сб. матер. Междунар. конф. Курск, 2015. С. 224-226.

Погорельский Семён Львович, канд. техн. наук, заместитель директора, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»,

Макарецкий Евгений Александрович, д-р техн. наук, профессор, makaretsky@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Овчинников Александр Викторович, канд. техн. наук, доцент, admin_telex@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Гублин Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, gublinas@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Понятский Валерий Мариафович, канд. техн. наук, доцент, начальник отдела, pwmru@yandex.ru, Россия, Тула, АО «КБП»

SOFTWARE COMPLEX FOR FORMATION AND PROCESSING OF HYPERSPECTRAL IMAGES

S.L. Pogorelsky, E.A. Makaretsky, A.V. Ovchinnikov, A.S. Gublin, V.M. Ponyatsky

The article discusses the implementation of the software complex for the formation and processing of hyperspectral images, presents the structure of the complex and the algorithm of its operation. Examples of presentation of experimental data processing results are presented.

Key words: software package, hyperspectral processing, computer modeling.

Pogorelsky Semyen Lvovich, candidate of technical sciences, DeputyDirector, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Makaretskiy Eugene Alexandrovich, doctor of technical science, docent, professor of department, makaretsky@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Ovchinnikov Aleksandr Victorovich, candidate of technical sciences, docent, admin_telex@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Gublin Aleksandr Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, admin_telex@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Ponyatskiy Valeriy Mariafovich, head of department, pwmru@yandex.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»

УДК 53.08; 004.932

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРОВ МАТЕРИАЛОВ И СЛОЖНЫХ ФОНОВ

С.Л. Погорельский, Е.А. Макарецкий, В.М. Понятский,
А.В. Овчинников, А.С. Гублин, А.А. Шилин

Описаны методика и результаты экспериментального исследования в диапазоне длин волн 460…960 нм коэффициентов спектральной яркости лакокрасочных покрытий, строительных материалов и растительных образований для различных сезонов. Полученные данные позволяют сформировать рекомендации по выделению фрагментов изображений на сложном фоне с помощью многоспектральных систем.

Ключевые слова: гиперспектральные системы, спектральная яркость отражения.

В последнее время предлагаются новые подходы к созданию систем мониторинга, основанные на принципиально новых технологиях гиперспектрального мониторинга [1]. Практическое применение гиперспектральных систем показало способность обнаруживать объекты при невысоком пространственном разрешении, а также малоконтрастные объекты на сложном фоне [2].

Для решения задач гиперспектрального мониторинга необходимо формирование экспериментальной базы данных по спектральным характеристикам различных объектов, природных и антропогенных фонов. В настоящее время основное внимание уделяется формированию базы данных методами аэро- и космической съёмки [1, 2], а наземным измерениям уделяется значительно меньше внимания.

Целью проведённых авторами экспериментальных исследований спектров отражений с помощью разработанной экспериментальной установки является создание базы данных по спектрам отражения покрытий, объектов, материалов и наземных фонов природного и антропогенного происхождения.

Методика эксперимента заключалась в исследовании спектров отражения путём измерения спектральных коэффициентов яркости поверхностей и фонов при естественном освещении в 12 спектральных полосах диапазона 460…960 нм.

Как известно [3], коэффициент яркости поверхности в данном направлении и при данных условиях освещения есть отношение яркости этой поверхности к яркости идеального рассеивателя, находящегося в тех же условиях освещения. Под идеальным рассеивателем подразумевается ортотропная поверхность, полностью отражающая по закону Ламберта весь падающий на неё лучистый поток.

Таким образом, коэффициент яркости r равен:

$$r = B_2 / B_1, \qquad (1)$$

где B_1 – яркость идеального рассеивателя; B_2 – яркость изучаемой поверхности.

В качестве идеального рассеивателя использовался калибровочный экран с известной спектральной яркостью отражённого излучения. Угловая характеристика диффузного отражения калибровочного экрана должна в максимальной степени соответствовать ортотропной поверхности.

Для измерения коэффициентов яркости производилось формирование цифрового спектрального многоканального видеоизображения сцены через интерференционные светофильтры, установленные перед объективом цифровой видеокамеры. Фильтры сменялись с небольшим интервалом по времени, чтобы избежать изменения условий освещения сцены.

Результатом формирования спектрального многоканального изображения являлись серии из 12 цифровых изображений, на каждом из которых зафиксировано изображение измеряемого объекта и калибровочного экрана (идеального рассеивателя).

В процессе обработки серии изображений оператор выделял на изображениях серии прямоугольные области измерения (объекта) и калибровочного экрана, для которых производилось измерение яркости путём усреднения яркости пикселей по области:

$$B_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M} B_{ij}^1}{NM}, \quad B_2 = \frac{\sum_{i=1}^{K}\sum_{j=1}^{L} B_{ij}^2}{KL}, \qquad (2)$$

где B_{ij}^1 – яркость пикселя калибровочного экрана с координатами i,j; N,M – размеры области анализа калибровочного экрана; B_{ij}^2 – яркость пикселя объекта с координатами i,j; K,L – размеры области анализа объекта. Коэффициент спектральной яркости рассчитывался по соотношению (1).

В процессе измерений должна быть обеспечена линейность преобразования яркости излучения в электрический цифровой сигнал цифровой видеокамерой в пределах её динамического диапазона. Для этого измерения производились при различных значениях диафрагмы объектива видеокамеры, а перед началом измерений в зависимости от условий освещения устанавливалась выдержка (время накопления) цифровой видеокамеры.

По результатам измерений с помощью разработанной программы производилась предварительная и тематическая обработка изображений.

Предварительная обработка включала:

- создание электронной папки эксперимента с описанием времени и места эксперимента, объектов измерений, погодных условий, условий освещения;

- сохранение серии изображений в папку эксперимента на жёсткий диск ЭВМ (серия включает четыре комплекта изображений по 12 изображений при четырёх значениях диафрагмы объектива);

- переименование и систематизация изображений в папке.

Тематическая обработка включала:

- оценку качества изображений в папке эксперимента по критериям насыщения (нелинейности преобразования) и зашумления; для этого программой обработки было предусмотрено выделение участков на изображении, имеющих яркость, выше установленной (уровень устанавливался в пределах 200…255);

- сортировку и отбор в серии кадров для построения графика спектральной яркости (отбор проводился последовательно по длинам волн, на экран выводились изображения для различных значений диафрагмы, по которым выбирался кадр, имеющий максимальный уровень яркости без превышения заданного уровня в зонах интереса – калибратор, объект, заданный фон);

- нормализацию изображений по яркости калибровочного экрана; при нормализации использовалась зависимость спектрального диффузного отражения калибровочного экрана B_{0i}, измеренная на образцовом спектрофотометре; нормализованная яркость равна $B_{ni} = \frac{B_{\lambda i}}{B_{0i}}$, где $B_{\lambda i}$ - измеренная яркость; B_{ni} - нормализованная яркость;

- измерение локальной или интегральной яркости объекта и фона; зона усреднения (интегрирования) могла задаваться при обработке от 3×3 пикселей до полного размера кадра; координаты области сохранялись;

- построение графика спектральной яркости объектов и фона; график отображались в прямоугольных координатах с выводом следующих зависимостей от длины волны: измеренные яркости калибратора, объекта и фона; нормализованные яркости калибратора, объекта и фона;

- расчёт контраста объекта на фоне в различных участках спектра; контраст рассчитывается по соотношению:

$$K = \left| \frac{B_{об} - B_ф}{B_{об} + B_ф} \right|, \qquad (3)$$

где $B_{об}$ - яркость объекта; $B_ф$ - яркость фона.

Измерения характеристик покрытий проводились на местности при естественном освещении одновременно с измерениями характеристик фонов.

Экспериментально измерялись коэффициенты спектральной яркости различных лакокрасочных покрытий, строительных материалов (кирпич, бетон, деревянные доски и плиты), а также растений и природных образований. Примеры результатов измерений спектральной яркости различных покрытий и материалов приведены на рис. 1 - 4.

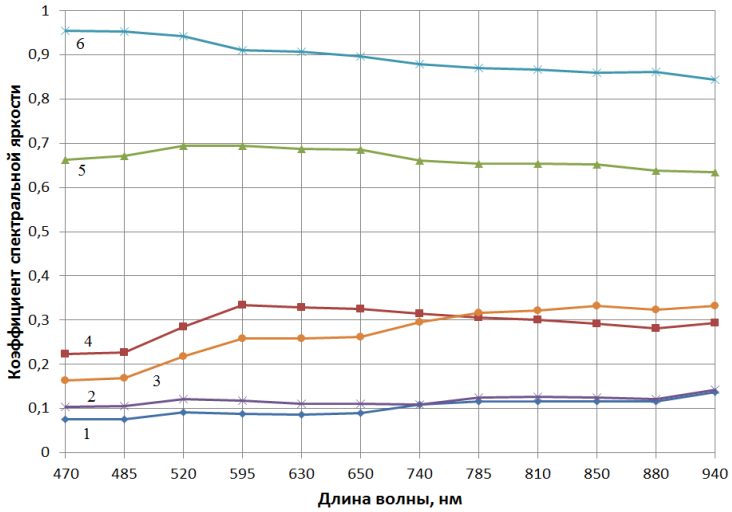


Рис. 1. Результаты измерений коэффициента спектральной яркости лакокрасочных покрытий: 1 - эмаль УР-2К М (3) зелёно - защитная; 2 - эмаль ХС-5146 (2) зелёно-защитная; 3 - эмаль ХС-5146 (2) серо-жёлтая; 4 - эмаль ХС-5146 (2) светло серо-жёлтая; 5 - окраска ОХТЭК-1ПМ светло-серая; 6 - эмаль УР-2К М (3) белая

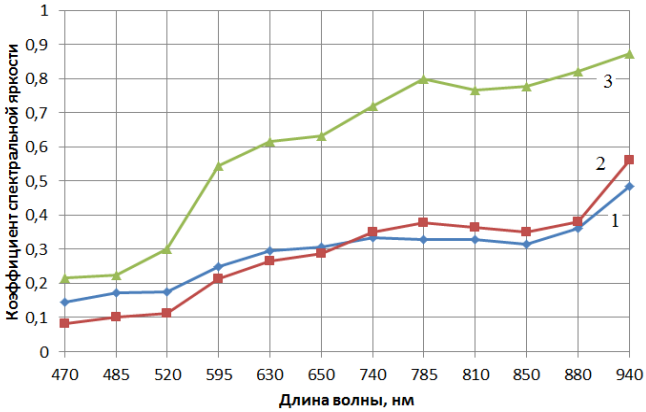


Рис. 2. Результаты измерений коэффициента спектральной яркости нового красного кирпича (1), старой кладки из красного кирпича (2), светлого (персикового) нового кирпича

Полученные результаты показывают, что спектры всех красок практически равномерны во всём измеренном диапазоне длин волн. Краски различных марок, но одинакового цвета (эмаль ХС-5146 (2) и эмаль УР-2К М (3)) зелёно-защитного цвета имеют близкие спектральные характеристики.

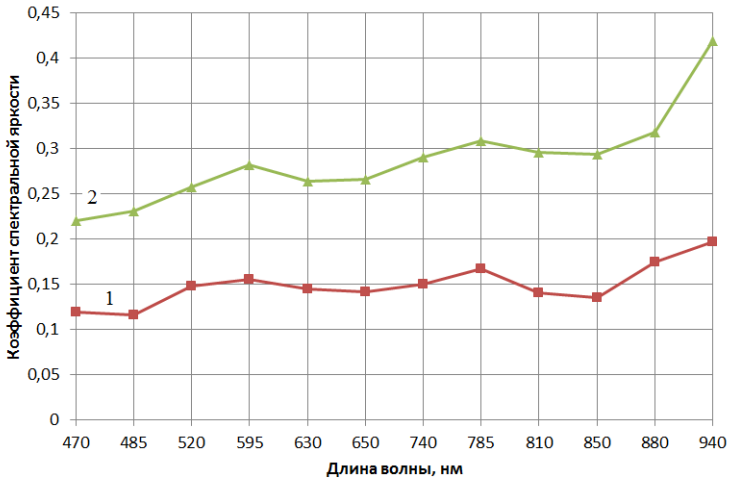


Рис. 3. Результаты измерений коэффициента спектральной яркости гладкого бетонного бордюрного блока (1) и бетонного столба (2)

Результаты измерений коэффициента спектральной яркости двух типов камуфляжной ткани приведены на рис. 4. Несмотря на внешнюю похожесть тканей, спектральные их характеристики существенно отличаются.

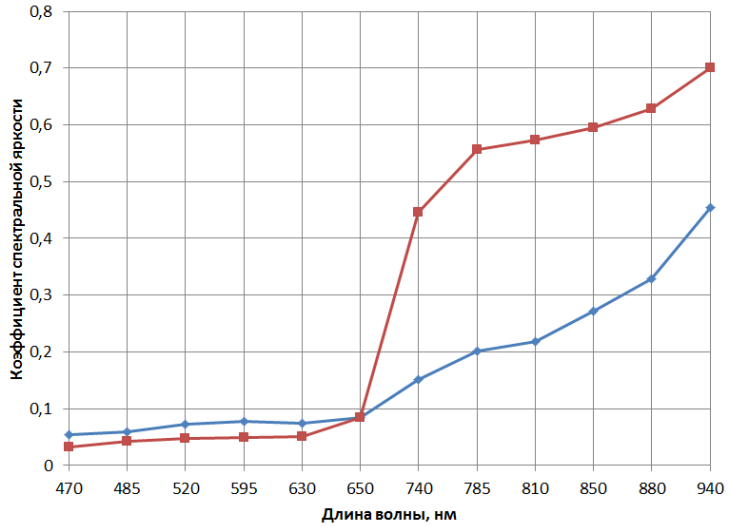


Рис. 4. Результаты измерения коэффициента спектральной яркости камуфляжных тканей

Из полученных результатов видно, что в видимом диапазоне ткани имеют низкий коэффициент спектральной яркости (0,05…0,08), но в диапазоне более 700 нм коэффициент спектральной яркости тканей резко возрастает, достигая 0,45 для первого образца и 0,7 - для второго.

При экспериментальном исследовании спектральных характеристик растений и природных образований измерялись коэффициенты спектральной яркости различных деревьев (сосна, ель, берёза, липа, дуб, клён), кустарников (калина, жёлтая акация, орешник), смешанного леса, лугов, водной поверхности, грунтовых дорог для условий весны, лета и осени.

На рис. 5 приведены результаты измерения спектральной яркости смешанного леса (лес включал берёзы, липы, ели, кустарник).

Измерения, проведённые в различные временные периоды, позволяют проследить существенное общее увеличение спектральной яркости с марта по июль (до 6 раз). Кроме того, заметно возрастание спектральной яркости в области длин волн 500…600

нм. В июне-июле спектральная яркость смешанного леса практически не меняется, в сентябре яркость снижается и спектр в видимой части спектра смещается из зелёной области в область более длинных волн.

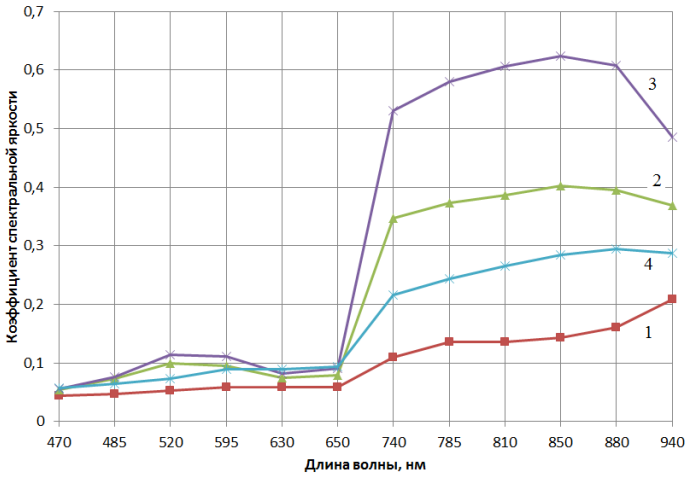


Рис. 5. Результаты измерения коэффициента спектральной яркости смешанного леса: 1 – 25 марта; 2 – 28 мая; 3 – 23 июля; 4 – 30 сентября

На рис. 6 приведены результаты измерений коэффициента спектральной яркости луга для различных сезонов.

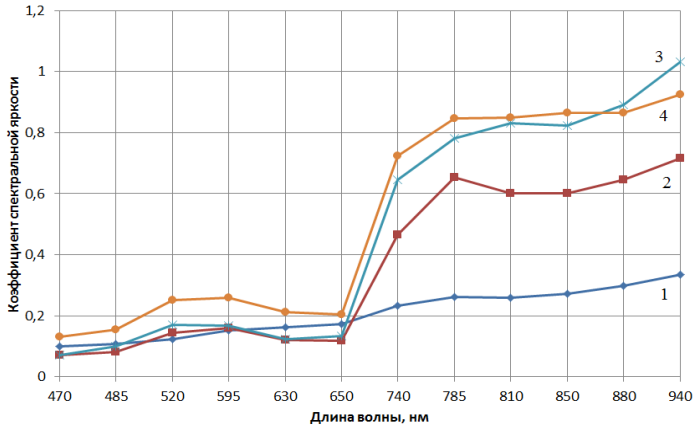


Рис. 6. Результаты измерения коэффициента спектральной яркости луга: 1 – 25 марта; 2 – 13 мая; 3 – 28 мая; 23 июля

Полученные при экспериментальных исследованиях результаты качественно хорошо согласуются с результатами Е.Л. Кринова [3]. В целом исследование спектральных характеристик растительных образований показало, что все измеренные спектры растительности имеют общий тип изменения с ростом длины волны:

- на длинах волн 470…520 нм – возрастание в 1,5…2 раза;
- в интервале 520…595 нм – спектральная яркость практически неизменна;
- в интервале 595…650 нм – постепенный спад на 30…40%;
- в интервале 650…740 нм – резкое возрастание спектральной яркости в 3…6 раз;
- в интервале 740…940 нм – спектральная яркость изменяется слабо.

Такой характер измерения спектральной яркости существенно отличается от характера изменения спектральной яркости исследованных красок (рис. 1) и подавляющего большинства автомобильных красок (равномерный спектр во всём диапазоне длин волн). Этот признак может использоваться для выделения окрашенных объектов на фоне местности.

Следует заметить, что спектральная характеристика одной из исследованных камуфляжных тканей (рис. 4) очень близко соответствует спектральной характеристике растительности.

Полученные результаты позволяют разработать рекомендации по использованию спектральных признаков при выделении объектов на сложном фоне в многоспектральных системах.

Список литературы

1. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.

2. Молчанов А.С. Состояние, развитие и применение гиперспектральных технологий в аэрокомплексах и системах воздушной разведки // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Гиперспектральные приборы и технологии». Красногорск, 2013. С. 21-23.

3. Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. Изд-во АН СССР. Москва Ленинград. 1947. 272 с.

Погорельский Семён Львович, канд. техн. наук, заместитель директора, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»,

Макарецкий Евгений Александрович, д-р техн. наук, профессор, makaretsky@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Овчинников Александр Викторович, канд. техн. наук, доцент, admin_telex@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Гублин Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, gublinas@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Понятский Валерий Мариафович, канд. техн. наук, доцент, начальник отдела, pwmru@yandex.ru, Россия, Тула, АО «КБП»,

Шилин Аркадий Александрович, канд. техн. наук, начальник сектора, arkadiy.shilin@mail.ru, Россия, Тула, АО «КБП»

EXPERIMENTAL RESULTS OF THE SPECTRA OF MATERIALS AND COMPLEX BACKGROUNDS

S.L. Pogorelsky, E.A. Makaretsky, A.V. Ovchinnikov, A.S. Gublin, V.M. Ponyatsky, A.A. Shilin

The technique and results of experimental research in the wavelength range of 460 ... 960 nm of spectral brightness coefficients of paint and varnish coatings, building materials and plant formations for different seasons are described. The data obtained make it possible to formulate recommendations for identifying objects against a complex background using multispectral systems.

Key words: hyperspectral systems, spectral brightness of reflection.

Pogorelsky Semyen Lvovich, candidate of technical sciences, deputy director, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Makaretskiy Eugene Alexandrovich, doctor of technical science, professor, makaretsky@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Ovchinnikov Aleksandr Victorovich, candidate of technical sciences, docent, admin_telex@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Gublin Aleksandr Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, admin_telex@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Ponyatskiy Valeriy Mariafovich, head of department, pwmru@yandex.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Shilin Arkadiy Alexandrovich, head of sector, arkadiy.shilin@mail.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»

УДК 004.932; 53.08

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ВЫДЕЛЕНИЯ ФРАГМЕНТОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА СЛОЖНОМ ФОНЕ МЕТОДАМИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ

С.Л. Погорельский, Е.А. Макарецкий, В.М. Понятский, А.А. Шилин

Приведены результаты исследования методов выделения фрагментов изображений на сложном фоне при использовании многоспектрального изображения. Рассмотрены задачи выбора числа информационных каналов и оптимизации отношения сигнал-фон и контраста изображения при весовой обработке информации каналов.

Ключевые слова: гиперспектральная обработка, обработка изображений, повышение контраста.

Одним из основных показателями качества оптико-электронных приборов наблюдения является условная вероятность обнаружения образов наблюдаемых полезных фрагментов человеком-оператором [1]. На обнаружение интересующих фрагментов изображения в конечном счёте влияет контраст наблюдаемого изображения, который может быть существенно различен в различных областях спектра.

Существуют многочисленные методы оценки свойств спектральных каналов и их комплексирования [2-4], но они отличаются большой вычислительной сложностью. При использовании гиперспектрального (многоспектрального) метода наблюдения часто возникает задача поиска простых алгоритмов, позволяющих в режиме реального времени производить сравнение качества каналов и выделение фрагментов изображений на сложном фоне по контрасту. В этом случае эффективной может быть весовая обработка сигналов.

Общая постановка задачи. Есть непрерывный спектр сигнала выбранных фрагментов изображения с распределение мощности по спектру $S(\lambda)$ и спектр фона с распределением мощности по спектру $F(\lambda)$, где $S(\lambda)$ и $F(\lambda)$ - детерминированные функции. Он измеряется в виде набора спектральных полос сигнала $S(\lambda) = [S_1, S_2, ... S_n]$ и фона $F(\lambda) = [F_1, F_2, ... F_n]$, где S_i, F_i - соответственно выходные полезный и фоновый сигналы i - го спектрального канала, описывающие математическое ожидание спектральной плотности. В пределах каждого спектрального интервала $\Delta\lambda_i$ сигналы формируются интегрально по спектру, ширина спектральных интервалов может быть различна.

Выходной сигнал многополосной системы формируется в виде взвешенной суммы спектральных сигналов:

$$S(\lambda) = \sum_{i=1}^{n} S_i \alpha_i \qquad (1)$$

и фона

$$F(\lambda) = \sum_{i=1}^{n} F_i \alpha_i , \qquad (2)$$

где α_i - весовые коэффициенты.

Задача состоит в определении весовых коэффициентов α_i, обеспечивающих максимум отношения сигнал – фон SF :

$$SF = S(\lambda) / F(\lambda) \qquad (3)$$

или контраста *K:*

$$K = \left| \frac{S(\lambda) - F(\lambda)}{S(\lambda) + F(\lambda)} \right| . \qquad (4)$$

Требования к весовым коэффициентам в зависимости от задачи могут формулироваться в следующей форме:

- задача выбора оптимального числа невзвешенных спектральных каналов, при этом коэффициенты α_i могут принимать только два значения: ноль и единица;

- задача оптимизации весовых коэффициентов при $\alpha_i = [0,1]$, т.е. для положительных значений $0 \le \alpha_i \le 1$ (в данном случае возможна простая аппаратная реализация алгоритма оптимизации);

- задача оптимизации весовых коэффициентов при $\alpha_i = [-1,1]$, т.е. для положительных и отрицательных значений $-1 \le \alpha_i \le 1$; расширение диапазона изменений значений весовых коэффициентов принципиально позволяет повысить эффективность весовой обработки, но усложняет алгоритмы её реализации.

В отличие от обычно рассматриваемых задач фильтрации сигналов на фоне аддитивного шума, в данном случае полезный сигнал и сигнал фона являются независимыми и пространственно расположены в различных областях изображения.

Рассматриваемые ниже алгоритмы на первом этапе используют приближение детерминированных сигналов, т.е. не учитывается шум в приёмных каналах.

1. Оптимизация числа спектральных каналов. Осуществляется спектральный многополосный приём изображения (число полос *N*); известны уровень сигнала по каждой спектральной полосе и уровень фона (это могут быть априорные данные по местности и характеру цели). Цель: определить количество и номера полос, обеспечивающих максимальный уровень сигнал-фон на выходе.

Алгоритм оптимизации включает выполнение следующих операций:

- по результатам анализа уровней сигналов во всех полосах, из 12 полос выбираются 5 полос с максимальным отношением сигнал-фон $SF_i = S_i(\lambda) / F_i(\lambda)$;

- методом простого перебора вычисляются результирующие выходные сигналы (1), (2) для каждой комбинации весовых коэффициентов; коэффициенты могут принимать значения 0 и 1; рассматриваются все возможные варианты сочетания полос (31 вариант) и рассчитывается отношение сигнал-фон SF на выходе;

- анализируется массив отношений сигнал-фон и определяется комбинация, обеспечивающая максимальный выигрыш относительно интегрального отношения сигнал-фон во всём спектральном диапазоне.

Одновременно вычисляется контраст и отношение сигнал-фон и анализируется оптимум по критерию контраста.

Оптимизация производилась для спектров яркости реальных фрагментов и фонов изображений, измеренных экспериментально в диапазоне длин волн 460…950 нм для 12 спектральных полос шириной 40…50 нм для двух характерных случаев: панель зелёно-защитного цвета на фоне берёзы; панель серо-жёлтого цвета на фоне песка.

На рис. 1 приведены зависимости спектральной яркости *r* панели зелёно-защитного цвета и фона «берёза» от номера полосы *N*.

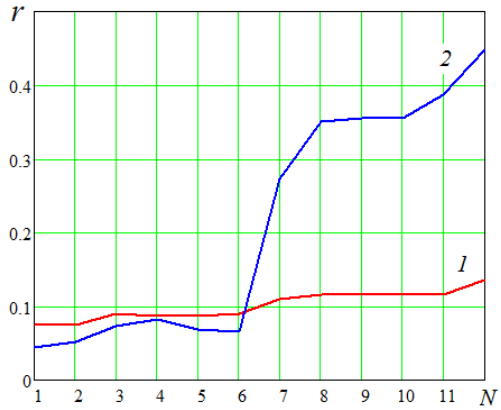


Рис. 1. Зависимости спектральной яркости r панели зелёно-защитного цвета (1) и фона «берёза» (2) от номера полосы N

При использовании описанного алгоритма для панели зелёно-защитного цвета и фона «берёза» выигрыш по отношению сигнал-фон составляет *VSF* = 3,605, а по контрасту *VK* = 0,738. Это объясняется тем, что при расчёте контраста по соотношению (4) для полос 7…12 имеет место большой «обратный» контраст, который не учитывается при первоначальном выборе полос (оптимальной является использование одной полосы № 1).

Поскольку для большей части каналов фон превышает сигнал (рис. 1), целесообразно использовать инверсию яркости изображений (соответственно выбираются другие спектральные полосы, для которых отношение сигнал-фон инвертированного изображения максимально). В этом случае оптимальным является использование одной полосы № 11. При этом выигрыш по контрасту составляет *VK* = 3,327, а по отношению сигнал-фон *VSF* = 1,372, что существенно лучше, чем без инверсии.

На рис. 2 приведены зависимости спектральной яркости *r* панели серо-жёлтого цвета и фона «песок» от номера полосы *N*. При оптимизации выигрыш по контрасту по сравнению с измерениями во всей спектральной полосе составляет *VK* = 1,07; по отношению сигнал-фон *VSF* = 1,02 (оптимально использование одного канала № 11).

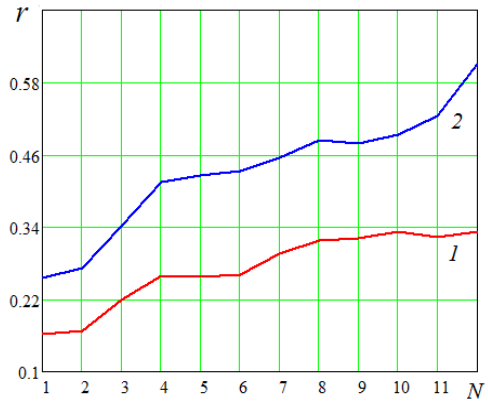


Рис. 2. Зависимости спектральной яркости r панели серо-жёлтого цвета (1) и фона «песок» (2) от номера полосы N

После инверсии спектральной яркости изображения оптимальным является использование одного канала № 12, для которого выигрыш по контрасту составляет *VK* = 2,113; выигрыш по отношению сигнал-фон равен *VSF* = 1,335. Аналогичные результаты получены и для других вариантов окрасок и фонов.

Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы:

- всегда оптимальным является использование только одной спектральной полосы с максимальным отношением сигнал-фон;

- максимальному значению контраста всегда соответствует максимальное отношение сигнал-фон;

- за счёт выбора одного оптимального канала возможно повышение контраста в 1,7…5 раз в зависимости от вида спектров полезного фрагмента и фона;

- при превышении уровня яркости фона над полезным фрагментом целесообразно использовать инверсию яркости изображения и оптимизацию инвертированного изображения;

- при равномерном характере спектров сигнала и фона выбор канала (или нескольких каналов) не даёт заметного результата;

- алгоритм повышения вероятности обнаружения цели в случае оптимизации выбора спектральных каналов заключается в измерении отношений сигнал-фон во всех спектральных полосах и выборе одного канала, для которого отношение сигнал-фон максимально.

2. Оптимизация весовой обработки. Алгоритм оптимизации заключается в следующем. При взвешивании общая мощность сигнала ISV рассчитывается:

$$ISV = \sum_{i=1}^{12} S_i \alpha_i \,, \tag{5}$$

где α_i – весовые коэффициенты; общая мощность фона IFV рассчитывается:

$$IFV = \sum_{i=1}^{12} F_i \alpha_i \,; \tag{6}$$

по результатам вычисляется отношение сигнал-фон SFV :

$$SFV = ISV / IFV \,; \tag{7}$$

и контраст $KSFV$

$$KSFV = \frac{|ISV - IFV|}{|ISV + IFV|}. \tag{8}$$

Задача: максимизировать отношение сигнал-фон SFV или контраст $KSFV$ при варьировании коэффициентов веса α_i .

2.1. Случай положительных весовых коэффициентов $0 \le \alpha_i \le 1$ Оптимизация проводилась поиском глобального экстремума функции 12 аргументов методом сопряжённых градиентов. Расчёты показали, что для всех рассмотренных случаев оптимальным является использование одного канала. Результаты приведены (табл. 1) для тех же сочетаний окраски панелей и фонов, что и при выборе каналов.

Таблица 1

Результаты оптимизации весовых коэффициентов

Параметр	Инвертирование яркости изображения	Тип окраски и фона	
		Фон берёза, эмаль зелёно-защитная	Фон песок, эмаль серо-жёлтая
Оптимальный канал	без инверсии	1	10
	с инверсией	12	12
Выигрыш по контрасту	без инверсии	0,737	1,07
	с инверсией	3,327	2,113
Выигрыш по отношению сигнал-фон	без инверсии	3,605	1,02
	с инверсией	1,371	1,335

Таким образом, использование оптимизации с произвольными положительными весовыми коэффициентами приводит к выбору одного канала с максимальным контрастом. Оптимальное значение веса для критерия максимума отношения сигнал-фон и контраста совпадают. Весовое суммирование нескольких каналов не оптимально.

2.2 Случай произвольного знака весовых коэффициентов $-1 \le \alpha_i \le 1$. Для сравнения примеры используют те же исходные данные, что и для предыдущего случая. При оптимизации использовался метод сопряжённых градиентов. Результаты расчётов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты оптимизации весовых коэффициентов

Параметр	Тип окраски и фона	
	Фон берёза, эмаль зелёно-защитная	Фон песок, эмаль серо-жёлтая
Выигрыш по контрасту	$9.568 \cdot 10^{13}$	$5{,}023 \cdot 10^{13}$
Выигрыш по отношению сигнал-фон	2,105	1,596
Весовые коэффициенты	-0.254	0.161
	-1	0.374
	-0.298	$-4.532 \cdot 10^{-4}$
	-1	0.21
	-0.281	0.591
	-1	0.628
	-0.056	-0.44
	-0.081	-0.609
	0.052	-1
	-0.061	-1
	0.105	0.343
	0.999	1

По результатам анализа алгоритмов выделения полезных фрагментов на фоне в многоспектральных системах можно сделать следующие выводы:

1. Алгоритм выбора количества спектральных каналов заключается в выборе только одного спектрального канала, для которого отношение сигнал-фон максимально.

2. При весовой обработке с положительными весовыми коэффициентами оптимальным является алгоритм выбора только одного канала с весовым коэффициентом, равным единице, для которого отношение сигнал-фон максимально, т.е. задача сводится к предыдущему случаю. Оптимальные параметры канала для оптимизации по максимуму отношения сигнал-фон и максимуму контраста совпадают.

3. При превышении яркости фона над яркостью интересующего фрагмента целесообразно производить инверсию яркости и затем – выбор оптимальной спектральной полосы.

4. При весовой обработке с положительными и отрицательными весовыми коэффициентами матрица весовых коэффициентов для случаев оптимизации по максимуму отношения сигнал-фон и максимуму контраста не совпадают. Теоретически возможно получение очень высоких значений отношения сигнал-фон и контраста. Однако эти результаты получены для математических ожиданий яркости сигнала и фона в спектральных каналах. При учёте случайного изменения яркости сигнала и фона будут наблюдаться резкие локальные выбросы и провалы контраста, поскольку при оптимизации весовые коэффициенты соответствуют только определённым уровням яркости в спектральных каналах.

5. Общий алгоритм повышения вероятности обнаружения целей с использованием многоспектральных измерений может заключаться в измерении отношений сигнал-фон во всех спектральных полосах на этапе наблюдения и поиска цели (или по априорным данным) и выборе одного канала, для которого отношение сигнал-фон максимально.

Список литературы

1. Травникова Н.П. Эффективность визуального поиска. М.: Машиностроение, 1985. 128 с.

2. Сельвесюк Н.И., Веселов Ю.Г., Гайденков А.В., Островский А.С. Оценка характеристик обнаружения и распознавания объектов на изображении от специальных оптико-электронных систем наблюдения летного поля // Труды МАИ. 2018. Выпуск № 103. [Электронный ресурс] URL: http://trudymai.ru (дата обращения: 10.03.2020).

3. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Кинематические и вероятностные характеристики процесса поиска и обнаружения движущегося объекта // Журнал радиоэлектроники, 2017. N3. [Электронный ресурс] URL: http://jre.cplire.ru (дата обращения: 15.06.2020).

4. Гулина Ю.С., Колючкин В.Я. Методика расчета вероятности распознавания изображений человеком-оператором // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012. №1. С. 101-107.

Погорельский Семён Львович, канд. техн. наук, заместитель директора, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»,

Макарецкий Евгений Александрович, д-р техн. наук, профессор, makaretsky@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Понятский Валерий Мариафович, канд. техн. наук, доцент, начальник отдела, pwmru@yandex.ru, Россия, Тула, АО «КБП»,

Шилин Аркадий Александрович, канд. техн. наук, начальник сектора, arkadiy.shilin@mail.ru, Россия, Тула, АО «КБП»

INVESTIGATION OF OBJECT DETECTION ALGORITHMS ON A DIFFICULT BACKGROUND BY HYPERSPECTRAL PROCESSING METHODS

S.L. Pogorelsky, E.A. Makaretsky, V.M. Ponyatsky, A.A. Shilin

The results of a study of methods for selecting images of objects on a complex background using a multispectral image are presented. The problems of selecting the number of information channels and optimizing the signal-to-background ratio and image contrast for weight processing of channel information are considered.

Key words: hyperspectral processing, image processing, contrast enhancement.

Pogorelsky Semyen Lvovich, candidate of technical sciences, deputy director, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Makaretskiy Eugene Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor, makaretsky@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Ponyatskiy Valeriy Mariafovich, head of department, pwmru@yandex.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Shilin Arkadiy Alexandrovich, head of sector, arkadiy.shilin@mail.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»

УДК 004.932; 53.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ ФРАГМЕНТОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА СЛОЖНОМ ФОНЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ RGB-СИГНАЛОВ

С.Л. Погорельский, Е.А. Макарецкий, В.М. Понятский, Д.Б. Егоров

Приведены результаты исследования методов выделения фрагментов изображения на сложном фоне при использовании разделения монохромного изображения на RGB каналы и оценки контраста в каналах, а также результаты экспериментального исследования, показывающие возможность повышения контраста в 1,5 – 3 раза.

Ключевые слова: обработка изображений, повышение контраста, обнаружение фрагментов на изображении.

Процесс обнаружения фрагментов изображения на сложном фоне с помощью оптико-электронных средств обычно производится на монохромных изображениях и требует обеспечения максимального контраста фрагмента и фона, что в практических применениях затруднено. Для повышения контраста изображения широко используются многоспектральные системы [1, 2], отличающиеся достаточной аппаратной сложностью и трудоёмкостью алгоритмов обработки [3].

В то же время спектральная (цветовая) информация об изображении содержится в выходных сигналах цифровых фотоприёмных матриц, в которых для формирования цветного изображения используется фильтр Байера [4], образованный четырьмя приёмными пикселями с цветовыми фильтрами: красный R пиксель, синий B пиксель и два зелёных G пикселя.

Известные спектральные характеристики чувствительности RGB пикселей фотоприёмной матрицы (рис. 1) принципиально позволяют осуществлять спектральную (цветовую) селекцию фрагментов на изображении.

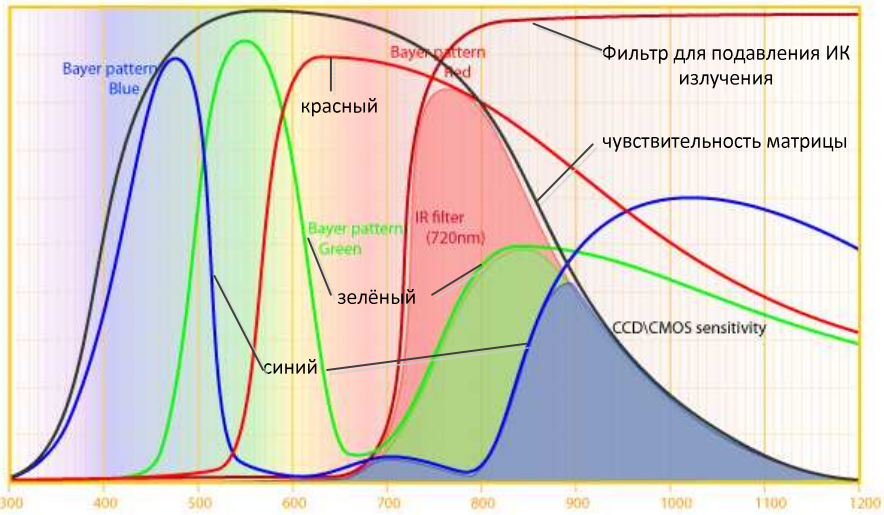


Рис. 1. Спектральные характеристики фильтра Байера, матрицы и фильтра подавления паразитных полос пропускания

При этом можно рассмотреть две задачи.

1. Измерение длины волны поступающего излучения на пиксель по интенсивности цветовых составляющих в RGB каналах пикселя цветного изображения. Это может позволить получить спектральную гистограмму цветного изображения.

2. Спектральная (цветовая) селекция фрагментов на цветном изображении. Решение данной задачи принципиально может позволить повысить контраст изображения и, соответственно, вероятность обнаружения интересующих фрагментов.

Измерение длины волны поступающего излучения по интенсивности цветовых составляющих в RGB каналах пикселя цветного изображения производится путём решения системы уравнений для RGB сигналов, пришедших на *i* – й пиксель изображения:

$$\begin{aligned} R_i &= T_R(\lambda); \\ G_i &= T_G(\lambda); \\ B_i &= T_B(\lambda), \end{aligned} \qquad (1)$$

где R_i, G_i, B_i – нормированные значения сигналов от соответствующих пикселей цветного кластера; $T_R(\lambda)$, $T_G(\lambda)$, $T_B(\lambda)$ - спектральные характеристики оптического пропускания соответствующих каналов фильтра Байера с учётом фильтра для подавления ИК излучения и спектральной зависимости чувствительности фотоприёмника (рис. 1).

Система уравнений (1) является нелинейной и требует использования достаточно сложных (часто итерационных) методов решения, описанных, например, в [4]. Результатом решения является длина волны λj, соответствующая заданным уровням цветовых сигналов Ri, Gi, Bi.

Для оценки возможностей предложенного метода было проведено моделирование алгоритма измерения длины волны входного излучения пикселя. Поскольку для решения системы нелинейных уравнений требуется предварительная локализация корней, использовалась двухэтапная процедура: на первом этапе приближённо оценивалось значение длины волны по возможным корням отдельных уравнений, затем по ним производилась предварительная локализация корня; на втором этапе система нелинейных уравнений решалась методом Левенберга-Марквардта. Результаты вычислений приведены на рис. 2.

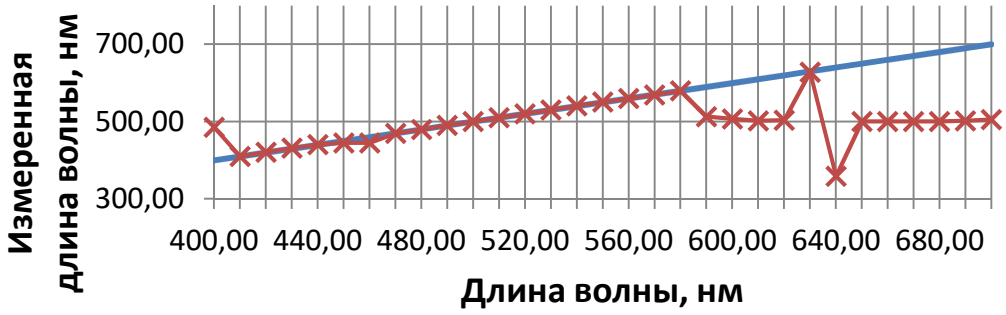


Рис. 2. Результаты решения системы нелинейных уравнений (сплошная линия – точное значение)

Анализ полученных результатов показывает, что на значительной части диапазона погрешность решения невелика (не превышает 1 нм), но в области больших длин волн ошибка резко возрастает, что может быть объяснено неточностью процедуры предварительной локализации корней. При усложнении алгоритма решения погрешность измерения длины волны излучения может быть достаточно низкой.

Дополнительные погрешности вызывает неточность измерения уровней цветовых сигналов Ri, Gi, Bi или неточности формирования характеристик конкретных фильтров RGB каналов матрицы.

Анализ показал достаточно сильное влияние погрешностей измерения уровней цветовых сигналов на погрешность определения длины волны излучения. В зависимости от положения уровня на спектральной характеристике пропускания (крутизны ската характеристики) погрешность может составлять от 0,2 до 2 нм/%. Кроме того, повышается вероятность ошибочных решений.

При решении второй задачи (цветовой фильтрации фрагментов) использовался метод весовой обработки. При этом возможны два варианта селекции:

а) использование весовых коэффициентов, увеличивающих уровень спектральных составляющих полезного фрагмента;

б) использование весовых коэффициентов, снижающих уровень спектральных составляющих фона.

Если исходно известны цветовые характеристики полезного фрагмента, то можно выставлять приоритет (весовой коэффициент) на определённый цветовой канал, т.е. вести весовую обработку в общем виде:

$$I(\lambda) = K_R R(\lambda) + K_G G(\lambda) + K_B B(\lambda)\ , \qquad (2)$$

где R(λ), G(λ), B(λ) – соответствующие сигналы цветовых каналов RGB; K_R, K_B, K_G - нормированные весовые коэффициенты; $I(\lambda)$ - выходной сигнал фотоприёмной матрицы.

При решении первой задачи (использование весовых коэффициентов, увеличивающих уровень спектральных составляющих полезного фрагмента) определение весовых коэффициентов для полезного фрагмента производится с учётом энергетического вклада каждого цветового канала спектра отражений:

$$K_R = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} R(\lambda) S_S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} [R(\lambda) + G(\lambda) + B(\lambda)] S_S(\lambda) d\lambda}; \qquad (3)$$

$$K_G = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} G(\lambda) S_S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} [R(\lambda) + G(\lambda) + B(\lambda)] S_S(\lambda) d\lambda}; \qquad (4)$$

$$K_B = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} B(\lambda) S_S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} [R(\lambda) + G(\lambda) + B(\lambda)] S_S(\lambda) d\lambda}, \qquad (5)$$

где $S_S(\lambda)$ - спектр отражения полезного фрагмента; λ_{max}, λ_{min} – соответственно максимальная и минимальная длины волн излучения.

В результате вычисления коэффициентов обеспечивается выполнение условия нормировки $K_R + K_G + K_B = 1$.

Расчёт выходных сигналов производится по выражениям:

- для фона I_F:

$$I_F = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{[R(\lambda) + G(\lambda) + B(\lambda)] S_F(\lambda)}{3} d\lambda\ ; \qquad (6)$$

где $S_F(\lambda)$ - спектр отражения фона;

- для сигнала полезного фрагмента при отсутствии дополнительной обработки (без взвешивания предполагается что весовой коэффициент по каждому каналу равен 1/3)

$$I_{S0} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{[R(\lambda) + G(\lambda) + B(\lambda)] S_S(\lambda)}{3} d\lambda\ ; \qquad (7)$$

- для выходного сигнала полезного фрагмента при весовой обработке:

$$I_{SV} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} [K_R R(\lambda) + K_G G(\lambda) + K_B B(\lambda)] S_S(\lambda) d\lambda \,. \quad (8)$$

Выигрыш Q от взвешивания сигнала (это конечный параметр эффективности) вычисляется как отношение сигнал/фон при отсутствии весовой обработки $SN_0 = \frac{I_{S0}}{I_{F0}}$ к отношению сигнал/фон с использованием весовой обработки $SN_V = \frac{I_{SV}}{I_{FV}}$, где

$$I_{F0} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} [R(\lambda) + G(\lambda) + B(\lambda)] S_F(\lambda) d\lambda \,; \quad (9)$$

$$I_{FV} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} [R(\lambda) K_R + G(\lambda) K_G + B(\lambda) K_B] S_F(\lambda) d\lambda \,; \quad (10)$$

$$Q = \frac{SN_0}{SN_V}. \quad (11)$$

Оптимальные значения весовых коэффициентов должны соответствовать условию:

$$[K_R, K_G, K_B]_{opt} \to \max Q(K_R, K_G, K_B). \quad (12)$$

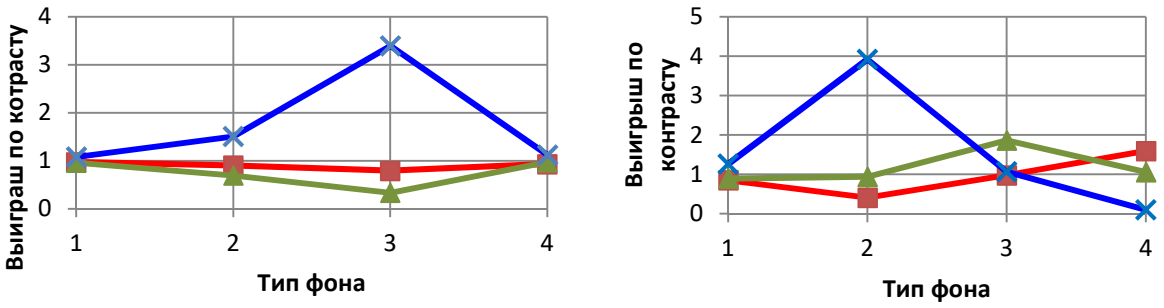
Результаты проведенного моделирования и оптимизации весовых коэффициентов показали, что оптимальным по эффективности фильтрации всегда является использование только одного спектрального канала. В тех случаях, когда спектры полезного фрагмента и фона однотипны, эффект минимален. Если форма спектров существенно различна, то выигрыш может быть значительным.

Для подтверждения полученных результатов было проведено экспериментальное исследование эффективности фильтрации изображений по RGB сигналам фотоприёмной матрицы. В процессе эксперимента фотографировалось исходное изображение образца (окрашенной панели) на природном фоне. Затем в процессе обработки изображение разделялось на RGB составляющие и измерялся контраст полезного фрагмента и фона в монохромном и RGB каналах. Контраст K рассчитывался по соотношению:

$$K = \left| \frac{B_{об} - B_ф}{B_{об}} \right|, , \quad (13)$$

где $B_{об}$ - яркость полезного фрагмента; $B_ф$ - яркость фона.

Результаты эксперимента приведены на рис. 3.



а ***б***

Рис. 3. Выигрыш по контрасту по сравнению с монохроматическим изображением для эмалей: а – серо-жёлтой; б – зелёно-защитной. Типы фона: 1 – ель; 2 – трава; 3 – небо; 4 – грунтовая дорога

Полученные результаты показывают, что используя простой алгоритм выбора *R, G* или *B* канала можно получить контрастность выше, чем для монохромного (в градациях серого) изображения. Это приведёт к повышению вероятности обнаружения полезного фрагмента.

Вместе с тем, при оценке эффективности использования RGB каналов необходимо дополнительно учитывать следующие факторы:

- чувствительность пикселей видеоматрицы в режиме RGB ниже, чем в монохромном режиме при том же размере пикселя; это объясняется потерями принимаемого оптического сигнала в процессе фильтрации фильтром Байера; так, расчёт показывает, что в диапазоне длин волн 400…700 нм для канала R чувствительность снижается в 2,4 раза, для канала G – в 3 раза, для B – в 3,5 раза;

- сравнение по общей чувствительности на кластер из четырёх пикселей даёт снижение общей чувствительности в 3 раза (в литературе приводятся значения снижения в 3…5 раз);

- при одинаковом размере пикселя монохромной и цветной матриц пространственное разрешение цветной матрицы всегда хуже, чем монохромной, поскольку для неё пространственный шаг расположения пикселей одного цвета в два раза больше, чем у монохромной матрицы; это особенно существенно для малопиксельных полезных фрагментов на изображении.

Поэтому принятие решения об использовании метода обработки изображения по RGB каналам требует учёта конкретных требований к разрабатываемой системе.

Список литературы

1. Ермаков Д.М., Смирнов М.Т. Комплексное использование разнотипных данных в задачах дистанционного зондирования океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сборник научных статей. М.: Полиграф сервис, 2005. С. 93-97.

2. Молчанов А.С. Состояние, развитие и применение гиперспектральных технологий в аэрокомплексах и системах воздушной разведки // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Гиперспектральные приборы и технологии». Красногорск, 2013. С. 21-23.

3. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.

4. Infrared photography on digital cameras. [Электронный ресурс] URL: https://www.hatiandskoll.com/2012/12/20/infrared-photography-on-digital-cameras (дата обращения: 01.10.2019).

Погорельский Семён Львович, канд. техн. наук, заместитель директора, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»,

Макарецкий Евгений Александрович, д-р техн. наук, профессор, makaretsky@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Понятский Валерий Мариафович, канд. техн. наук, доцент, начальник отдела, pwmru@yandex.ru, Россия, Тула, АО «КБП»,

Егоров Дмитрий Борисович, инженер, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО »КБП»

RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF OBJECT SELECTION ON A DIFFICULT BACKGROUND WHEN PROCESSING RGB SIGNALS

S.L. Pogorelsky, E.A. Makaretsky, V.M. Ponyatsky, D.B. Egorov

The results of the study of methods for extracting fragment of images against a complex background using the division of a monochrome image into RGB channels and assessing the contrast of objects in the channels are presented. The results of an experimental study are presented, showing the possibility of increasing the contrast by 1.5 – 3 times.

Key words: image processing, contrast enhancement, object detection in the image.

Pogorelsky Semyen Lvovich, candidate of technical sciences, deputy director, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Makaretskiy Eugene Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor, makaretsky@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Ponyatskiy Valeriy Mariafovich, head of department, pwmru@yandex.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Egorov Dmitriy Borisovich, engineer, gosha_fighten@mail.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»

УДК 681.783

РАЗРАБОТКА МНОГОСПЕКТРАЛЬНОГО ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ И ФОНОВ

С.Л. Погорельский, Е.А. Макарецкий, А.В. Овчинников, А.С. Гублин, В.М. Понятский, А.А. Шилин

Представлен вариант реализации многоспектрального программно-технического комплекса на основе цифровой видеокамеры и набора интерференционных фильтров, обеспечивающий формирование последовательного потока спектральных изображений и их последующую обработку.

Ключевые слова: спектральная селекция, гиперспектральная съёмка, телевизионные системы, мальтийский механизм.

Введение. Многоспектральные и гиперспектральные методы и устройства позволяют с высокой точностью определять характеристики поглощения и отражения объектами электромагнитных волн в заданном диапазоне. При этом представленные на рынке аппаратные и программные решения, достаточно дороги и изготовлены не на территории РФ, что накладывает ограничение на их использование в ряде приложений. Поэтому перед авторами стояла задача разработки многоспектрального программно-технического комплекса (ПТК) для исследования фонов и объектов различной природы.

В зависимости от предполагаемой задачи многоспектральные оптические системы могут иметь различную конструкцию. В работе [1] выделено четыре типа их построения:

- системы с автономными (независимыми) каналами, каждый из которых оснащён собственным матричным приёмником;
- системы с единым объективом и сменными спектральными фильтрами, либо сменными приёмниками излучения;
- системы, использующие двух- или многодиапазонные приёмники излучения;
- системы с единым входным компонентом и спектроделителями.

Использование нескольких независимых каналов или спектроделителей позволяет получать многоспектральное изображение «в реальном времени», и широко применяется в системах, расположенных на борту летательных аппаратов и наземного транспорта.

Однако при большом числе анализируемых спектральных диапазонов конструкция систем с автономными каналами значительно усложняется.

Рассматриваемый в данной статье программно-технический комплекс призван решать задачу спектрального анализа изображения неподвижных объектов на сложном фоне. Анализ возможных конструкций показал, что в этом случае наиболее простой и экономически целесообразный подход – создание системы с единым приёмником, единым объективом, несколькими сменными фильтрами и механизмом их выведения на оптическую ось объектива.

1. Аппаратная реализация комплекса. 1.1. Основные составные части комплекса и требования к ним. На начальном этапе работы были определены минимальные требования к составляющим частям комплекса и подобраны необходимые компоненты для его реализации с учётом условий его эксплуатации, методики проведения съёмок и обработки результатов. Основные составные части комплекса и их краткие технические характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Составные части программно-технического комплекса

№	Наименование	Основные технические характеристики
1	Цифровая камера Baumer VCXU-13M	1280x1024, ½», 222 кадров/сек, 10 бит, C-mount, USB3 и Digital I/Os
2	Объективы: AZURE-0814mm AZURE-5020mm	 1/2», 2MP, 8mm, C-mount 2/3», 2MP, 50mm, C-mount
3	Набор интерференционных светофильтров компании MidOpt серии BN (12 шт.)	BN470 (460-490 нм), BN485 (480-490 нм), BN520 (510-545 нм), BN595 (580-610 нм), BN630 (625-645 нм), BN650 (638-672 нм), BN740 (730-755 нм), BN785 (770-790 нм), BN810 (798-820 нм), BN850 (840-865 нм), BN880 (855-890 нм), BN940 (928-955 нм)
4	Осветитель	Галогенный источник, 300 Вт
5	Калибровочный экран	На основе материала Matte White FiberGlass с широким углом диффузного отражения (160^0 по уровню 0,7 от максимума)
6	Блок обработки (ноутбук с предустановленным программным обеспечением «2nd Look»)	Intel Core I7-8550U / 8Гб / 1 Тб / 2 Гб / USB 3.1; USB 3.0; USB 2.0
	Источник автономного питания (аккумулятор)	Герметичный, 12В, 7А*ч

Ключевой задачей при реализации ПТК являлась разработка механизма смены светофильтров.

Выведение светофильтров на ось объектива можно организовать множеством способов – как чисто механическими решениями, так и электронно-управляемыми механизмами. Учитывая особенности компоновки, требования к неподвижности светофильтров в момент съёмки кадра, было принято решение в данной реализации ПТК использовать мальтийский механизм, преобразующий постоянное вращение одной оси в прерывистое вращение другой.

1.2. Устройство и принцип работы комплекса. В состав разработанного ПТК входят:

многоспектральная камера, включающая:

несущую раму с интегрированным в неё механизмом смены светофильтров и блоком управления электродвигателем и камерой;

цифровую камеру видимого диапазона Baumer VCXU-13M;

объектив AZURE-0814mm (возможна установка объектива AZURE-5020MM из комплекта поставки);

набор интерференционных светофильтров компании MidOpt серии BN (12 шт.);

осветитель для съемки объектов с недостаточным уровнем естественного освещения;

калибровочный экран из ткани Matte White FiberGlass с известной характеристикой диффузного и зеркального отражения;

штативы для крепления видеокамеры и калибровочного экрана;

ноутбук с предустановленным программным обеспечением «2nd Look»;

источник автономного питания – герметичный свинцово-кислотный аккумулятор с выходным напряжением 12 В.

Несущая рама с интегрированным в неё механизмом смены светофильтров и блоком управления электродвигателем и камерой (рис. 1) включает в себя:

вращающийся диск с установленными на него светофильтрами;

вал, приводимый в действие двигателем;

печатную плату с установленными на неё элементами;

каретку для крепления видеокамеры;

видеокамеру;

оптопару;

механизм гашения колебаний.

Фильтры расположены на диске равномерно, по окружности с радиусом R = 80 мм. Диск приводится в движение двигателем постоянного тока через мальтийский механизм, который преобразует равномерное вращательное движение двигателя в прерывистое вращательное движение диска. Реализации мальтийского механизма показана на рис. 2. Каждый оборот вала двигателя выводит на оптическую ось следующий фильтр, а конструкция механизма надёжно фиксирует его в этом положении во время съёмки кадра. Питание двигателя осуществляется от аккумулятора через управляющий полевой транзистор. Для возможности регулировки скорости вращения диска, и соответственно, скорости съёмки, предусмотрено управление двигателем с помощью ШИМ-сигнала.

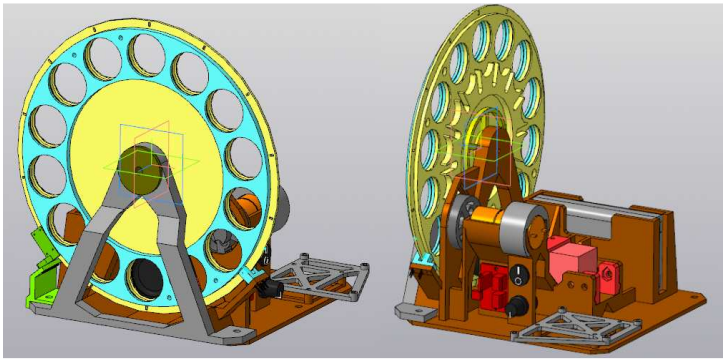


Рис. 1. Эскиз многоспектральной установки (печатная плата не отображена)

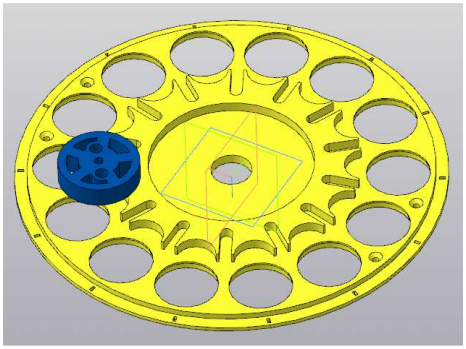


Рис. 2. Мальтийский механизм, включающий ведомый диск (желтый) и ведущий вал (синий)

Соответствие посадочных мест на вращающемся диске (рис. 3) и фильтров приведено в табл. 2.

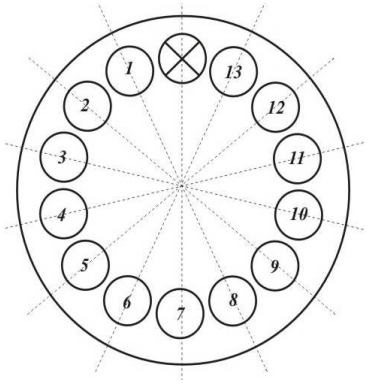


Рис. 3. Расположение фильтров на вращающемся диске (вид спереди)

Таблица 2

Соответствие посадочных мест на вращающемся диске и фильтров

№ посадочного места	Центральная длина волны фильтра, нм	№ посадочного места	Центральная длина волны фильтра, нм
X	Начальная метка «X»	7	740
1	470	8	785
2	485	9	810
3	520	10	850
4	595	11	880
5	630	12	940
6	650	13	Фильтр отсутствует

Все детали механизма смены фильтров и несущая рама напечатаны на 3D-принтере пластиком HIPS (ударопрочный полистирол). Внизу рамы имеется резьбовое отверстие под стандартный крепёж для камер с резьбой UNC 1/4-20, что позволяет монтировать установку на любой штатив.

Структурная схема электрической части программно-технического комплекса представлена на рис. 4. Синими линиями на схеме выделены цепи питания, зелёными – линии управления. Взаимодействие всех электрических и механических компонентов обеспечивается микроконтроллером Arduino Nano v.3.

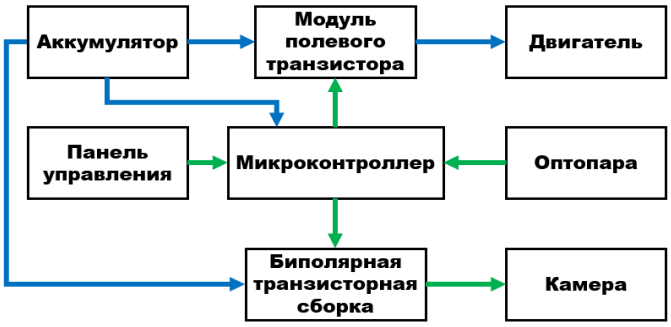


Рис. 4. Упрощённая структурная схема электрической части устройства

Схема управления расположена на односторонней печатной плате. На ней же расположены кнопки, позволяющие выбрать необходимый режим работы.

2. Программно-алгоритмическая реализация комплекса. Программная часть комплекса представлена двумя продуктами - «2nd Look» компании IO Industries (Канада) и разработанным программным модулем «Гиперспектральная обработка».

«2ndLook» удобное программное обеспечение для записи данных в режиме реального времени на жесткий диск ПК с видеокамеры. Поддерживает запись многих популярных форматов файлов (TIFF, AVI, JPEG, BMP и т.д) [3]. «2ndLook» поддерживает интерфейсы USB3 Vision, GigE Vision и позволяет выполнять «тонкие» настройки параметров камеры, используемой в комплексе.

Разработанный модуль «Гиперспектральная обработка» реализован с использованием среды Matlab, что позволило сократить время его разработки за счет использования специализированных функций и позволяет:

генерировать тестовые гиперспектральные изображения на основе исходных данных, определяемых пользователем;

сопровождать эксперимент для обеспечения единства методики проведения эксперимента на ПТК, выявления изображений, характеристики которых не удовлетворяют требуемым (например, наличие насыщения в областях интереса и прочее), ведения и обслуживания единой базы данных по проведенным экспериментам;

выполнять анализ экспериментальных данных - автоматизировать расчеты числовых параметров, выбирать наилучшие канальные изображения по заданному критерию, при работе с несколькими сериями, а также графически визуализировать полученные результаты.

Общий алгоритм работы с программно-техническим комплексом заключается в следующем.

Многоспектральная камера подключается к ноутбуку и запускается программное обеспечение «2ndLook». В нём оператор задаёт необходимые параметры (такие как время экспозиции, директорию для записи изображений и др.), устанавливает режим работы по триггеру и включает запись. Камера переходит в режим ожидания сигнала с линии триггера.

Далее оператор нажимает кнопку старта работы на панели управления установкой. Запускается двигатель, приводя в движение диск с фильтрами. В момент вывода очередного фильтра на требуемое место диск одним из своих мелких окон на краю открывает пространство между эмиттером и детектором оптопары, которая отправляет сигнал в микроконтроллер. После небольшой задержки, компенсирующей возможное преждевременное срабатывание оптопары, микроконтроллер через транзисторную сборку отправляет сигнал на вход линии триггера камеры, тем самым подавая команду на съёмку кадра. После того, как на оптическую ось выводится следующий фильтр, алгоритм повторяется.

Последующая обработка полученных экспериментально снимков выполняется в разработанном модуле «Гиперспектральная обработка».

Заключение. Рассмотренный в данной статье комплекс прошел апробацию в ходе экспериментального исследования спектров отражения фонов и объектов, чем доказал свою эффективность и работоспособность при различных погодных условиях и внешней освещенности.

Список литературы

1. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приёмниками излучения // Университетская книга. Логос, 2007. 192 с.

2. Shreer O., Lopex M. S., Peppermuller C., Hierl T., Bachmann K., Clement D., Fries J. Helicopter-Borne Dual-Band Dual-FRA System // Proc. SPIE. 2003. Vol. 5074. P. 637-647.

3. Удобное ПО для записи видео IO Industries 2ndLook. [Электронный ресурс] URL: https://www.cameraiq.ru/catalog/series/2ndLook-po-dlia-zapisi-video (дата обращения: 24.10.2020).

Погорельский Семён Львович, канд. техн. наук, заместитель директора, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»,

Макарецкий Евгений Александрович, д-р техн. наук, профессор, makaretsky@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Овчинников Александр Викторович, канд. техн. наук, доцент, admin_telex@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Гублин Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, gublinas@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Понятский Валерий Мариафович, канд. техн. наук, доцент, начальник отдела, pwmru@yandex.ru, Россия, Тула, АО «КБП»,

Шилин Аркадий Александрович, канд. техн. наук, начальник сектора, arkadiy.shilin@mail.ru, Россия, Тула, АО «КБП»

DEVELOPMENT OF MULTI-SPECTRAL SOFTWARE AND TECHNICAL COMPLEX FOR RESEARCHING OBJECTS AND BACKGROUNDS

S.L. Pogorelsky, E.A. Makaretsky, A.V. Ovchinnikov, A.S. Gublin, V.M. Ponyatsky, A.A. Shilin

A variant of the implementation of a multispectral software and hardware complex based on a digital video camera and a set of interference filters, which provides the formation of a sequential stream of spectral images and their subsequent processing, is presented.

Key words: spectral selection, hyperspectral imaging, television systems, Maltese mechanism.

Pogorelsky Semyen Lvovich, candidate of technical sciences, deputy director, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Makaretskiy Eugene Alexandrovich, doctor of technical science, professor, makaretsky@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Ovchinnikov Aleksandr Victorovich, candidate of technical sciences, docent, admin_telex@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Gublin Aleksandr Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, admin_telex@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Ponyatskiy Valeriy Mariafovich, head of department, pwmru@yandex.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Shilin Arkadiy Alexandrovich, head of sector, arkadiy.shilin@mail.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»

УДК 621.396.93

ДВУХЧАСТОТНАЯ СХЕМА СИНХРОНИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ

Нгуен Суан Чыонг

В данной работе проведен анализ одного из методов синхронизации несущей задающих генераторов, разнесённых в пространстве – двухчастотной схемы синхронизации. В основу методики проектирования положена разработанная схема двухчастотной синхронизации. Рассмотрены и оценены условия стабилизации фазы, влияние дополнительных факторов на систему синхронизации.

Ключевые слова: схема синхронизации, фазовая синхронизация.

Актуальность. Последние годы свидетельствуют о феноменальном прогрессе в беспроводных цифровых технологиях передачи, включая мобильные телефоны, системы цифрового вещания (спутниковые и наземные) и беспроводные локальные сети.

Характерной особенностью бурно развивающейся космической техники является увеличение числа и усложнение задач, решаемых современными космическими аппаратами (КА). Эффективность решения их существенно зависит от технических характеристик, которые имеют бортовые системы, обеспечивающие функционирование КА. В частности, от того, каков облик системы управления полетом космического объекта, каковы ее энергетические, динамические и точностные характеристики, в значительной степени зависит, какие задачи и как качественно сможет решить данный космический объект.

Одной из центральных проблем создания спутниковой системы, является проблема взаимной комплексной синхронизации (временной, пространственной и фазовой), без решения которой невозможно использовать большие потенциальные возможности КА [2 – 7].

Одним из перспективных методов, которые могут решить проблему синхронизации, является использование системы с обратной связью, измеряющей и компенсирующей фазовые ошибки несущего сигнала [1].

Целью данной работы является разработка методики синхронизации пространственно разнесенных устройств. Для этого необходимо:

- Пронализировать трудности при синхронизации генераторов, разнесённых в пространстве; выявить недостатки схемы одночастотной синхронизации.
- Разработать схемы двухчастотной синхронизации; получить аналитические выражения для фазового смещения сигналов, формируемых генераторами;
- Оценить условия стабилизации фазы, влияние характеристик среды передачи и качества составляющих подсистем на систему синхронизации.

Трудности при синхронизации генераторов, разнесённых в пространстве. Наибольшее влияние на стабильность генератора оказывают:

- изменения температуры окружающей среды;
- изменения напряжения электропитания;
- изменение атмосферного давления;
- ускорение (при установке генераторов в движущихся объектах);
- вибрация (при установке генераторов в движущихся объектах).

Даже используя высокостабильные генераторы, частота их несущих может отличаться на сотни герц. Кроме того, каждый генератор имеет независимый случайный дрейф фазы, определяющийся спектральными свойствами его фазовых шумов. Эти эффекты делают синхронизацию еще сложнее. Основным требованием является синхронизация обоих разнесённых генераторов. Одним из возможных методов является фиксация одной частоты относительно другой. Эта операция может сочетаться с компенсацией сдвига фазы [1].

В схеме одночастотной синхронизации центральный блок генерирует и передаёт синусоидальный сигнал с фиксированной частотой (рис.1). Этот сигнал получает удаленный блок, который синхронизирует свой собственный генератор на эту частоту и передает восстановленный сигнал обратно в центральный блок. Центральный блок восстанавливает этот сигнал обратной связи, и вычисляет смещение фазы канала передачи. С помощью этой информации центральный блок регулирует фазу своего сигнала.

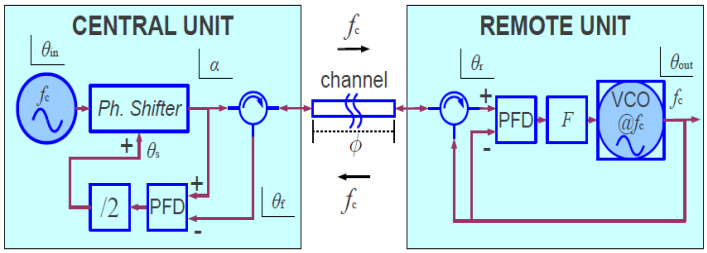


Рис. 1. Схема одночастотной фазовой синхронизации: Ph. Shifter – переменный фазовращатель; PFD – фазовый детектор; F – фильтр; VCO – генератор, управляемый напряжением (ГУН)

Для осуществления этого метода необходимо, чтобы передача и прием в обоих блоках имели идеальные направленные свойства, что означает способность разделить и отличить две различных волны в зависимости от направления их распространения. Это означает, что не должно быть никаких помех между двумя сигналами, которые движутся в противоположных направлениях в канале.

Кроме того, также предполагается, что каналы согласованы как с центральным блоком, так и удаленным устройством. Это означает, что не будет никаких отражений на линии.

Поэтому данная схема практически трудно осуществима, поскольку требует высокого уровня развязки прямого и обратного каналов.

Двухчастотная схема синхронизации. Основная идея метода - использование двух сигналов, которые движутся в противоположных направлениях вдоль тракта передачи.

Предлагаемая схема основана на использовании для передачи центр-удалённый блок двух поднесущих, для которых частота синхронизации точно равна средней частоте из двух поднесущих. Первая частота имеет неизменную фазу, а другая имеет фазы, которые корректируются в целях компенсации полного цикла фазовых сдвигов. В результате формируется общий фазовый сдвиг, близкий к нулевому, что обеспечивает линейный режим работы фазового детектора (рис. 2).

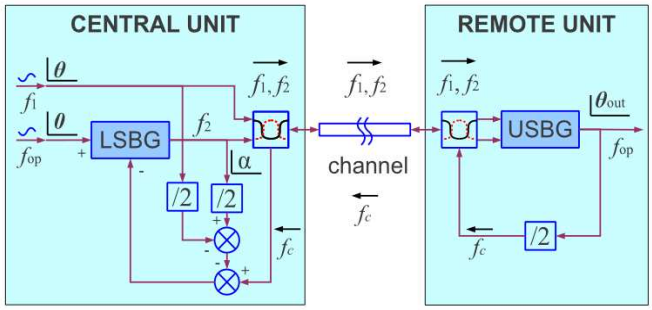


Рис. 2. Двухчастотная схема синхронизации: LSBG – генератор нижней боковой частоты; USBG – генератор верхней боковой частоты

В данной схеме первый сигнал имеет частоту $f_1 = f_c - f_m$ и неизвестную произвольную фазу θ. Частота второго сигнала равна $f_2 = f_c + f_m$, и ее фаза α регулиру-

ется в целях компенсации смещения неизвестной фазы θ канала. В стационарном состоянии, если фаза компенсируется правильно, то значение α должен быть равен $2\phi - \theta$, где $\phi = \omega_c \tau_d$ - фазовый сдвиг, связанным с несущей частотой $f_c = \frac{\omega_c}{2\pi}$.

Удаленный блок восстанавливает несущую с частотой f_c и передаёт её обратно в центральный блок. Фаза сигнала обратной связи, наблюдаемая в центральном блоке равна:

$$\theta_f = \frac{\theta}{2} + \frac{\alpha}{2} - 2\phi.$$

Эта фаза может быть использована для получения фазы α, необходимой для управления в цепи обратной связи.

Если предполагается, что несущая входной фазы θ_{in} равна нулю, то можно получить вариант, подходящий для преобразования полученного сигнала обратной связи. Конверсию сигнала получают путем смешивания фазы несущей и частоты (преобразование «вниз»), разделяющей сигналы. Преобразованная фаза несущей:

$$\theta_{down-conversion} = 0 + \frac{\alpha}{2} - \frac{\theta}{2};$$

$$f_{down-conversion} = f_2 = f_c + \frac{f_1}{2} - \frac{f_2}{2}.$$

В результате, значение декодированной фазы становится:

$$\theta_{decoded} = \theta_{down-conversion} - \theta_f = 2\phi - \theta; \; f_{decoded} = f_m = f_2 - f_c$$

Наконец, контролируемый сигнал, частота которого равна $f_2 = f_c + f_m$, получен через преобразование «вверх» несущей и декодированного низкочастотного сигнала. Его фаз α, имеет значение:

$$\alpha = 0 + \theta_{decoded} = 2\phi - \theta.$$

Функциональная схема формирования контролируемого сигнала x_2, показана на рис. 3. Эта схема показывает, как можно получить компенсацию сигнала без осуществления фазового детектирования на нулевой частоте.

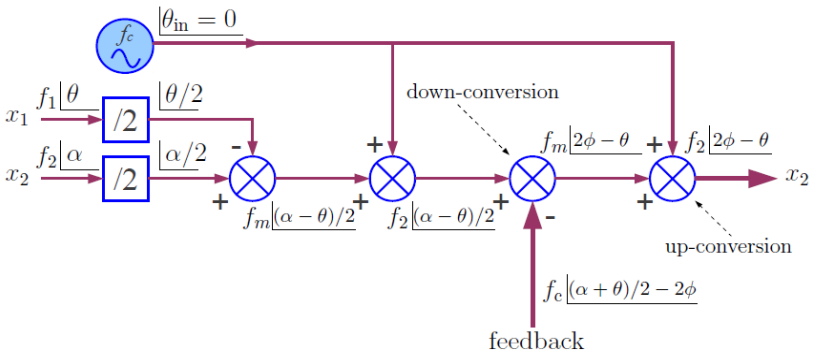


Рис. 3. Функциональная схема формирования сигнала управления

В схеме, показанной на рис. 3 видно также, что несущая опорного сигнала используется для преобразования два раза. Следовательно, схема может быть упрощена заменой двух узлов преобразования несущей опорного сигнала только одним узлом преобразования для входного сигнала. Кроме того, сигнал с частотой $2f_c$ также генерируется в удалённом блоке в USBG. Затем его также можно использовать в петле синхронизации несущей на удвоенную частоту преобразователя частоты. Этот схема имеет преимущество, позволяющее осуществлять синхронизацию на частоте, равной половине частоты несущей.

На рис. 4 показана структурная схема генерации компенсационного сигнала с помощью несущей с частотой частот $2f_c$, равной опорной частоте f_{op}. В практической реализации выходной сигнал должен быть получен с восстановлением фазовой синхронизации.

Модернизированная двухчастотная схема синхронизации основана на схеме слежения, показанной на рис. 4. Общая схема фазовой синхронизации показана на рис. 2. В этой схеме порядка точки преобразования в петле обратной связи изменены, хотя в целом результат сохраняется.

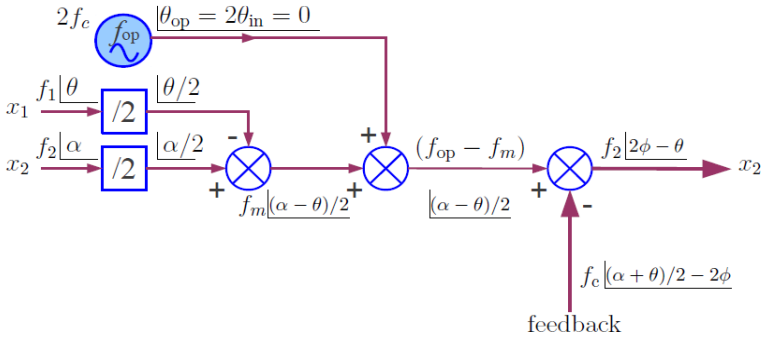


Рис. 4. Структурная схема генерации компенсационного сигнала

Генератор нижней боковой частоты формирует сигнал x_2 с частотой смещения фазовой автоподстройки частоты. Для данной реализации, в частности, на положительный вход фазы LSBG поступает несущая частота сигнала с частотой $f_{op} = 2f_c$ и на отрицательный вход - сигнал с частотой f_1, а фазы равны: $\theta - 2\phi$ эквивалентно $-\alpha$. Кроме того, разность фаз между этим сигналом и x_1 может быть использована для измерения сдвига фазы канала.

Одним из преимуществ предлагаемой схемы является то, что характеристика канала может быть выполнена с набором частот f_1, f_2 и f_c, при очень малом интервале между ними без влияния на точность системы.

Моделирование и анализ результатов. В данном разделе рассматривается двухчастотная схема синхронизации в значительной степени определяющая зависимость ошибки по фазе от частоты среза ФНЧ, и точность синхронизации всей схемы. Схема для моделирования построена по структурной схеме, изображена на рис. 2. Общая схема для моделирования показана на рис. 5.

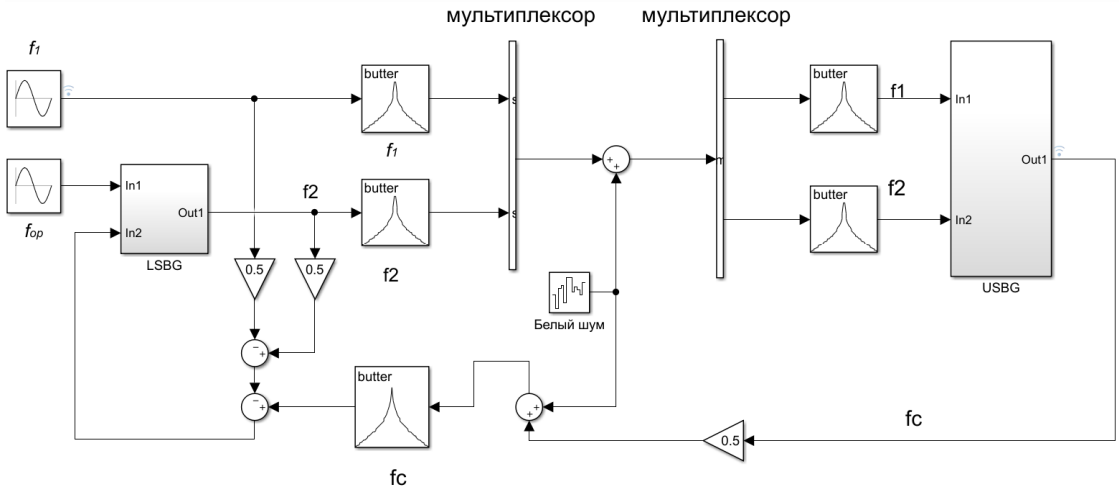


Рис. 5. Схема двухчастотная синхронизация для моделирования

На входе 2 генератора на $f_1 = 2340$ МГц, $f_{op} = 4800$ МГц. Оба устройства (центральный и удаленный блоки) подключены к каналу передачи через частотный мультиплексор. Это устройство включает фильтры разных диапазонов частот вблизи частот f_1, f_2.

На рис. 6 представлены результаты имитационного моделирования при различных значениях начальных фаз.

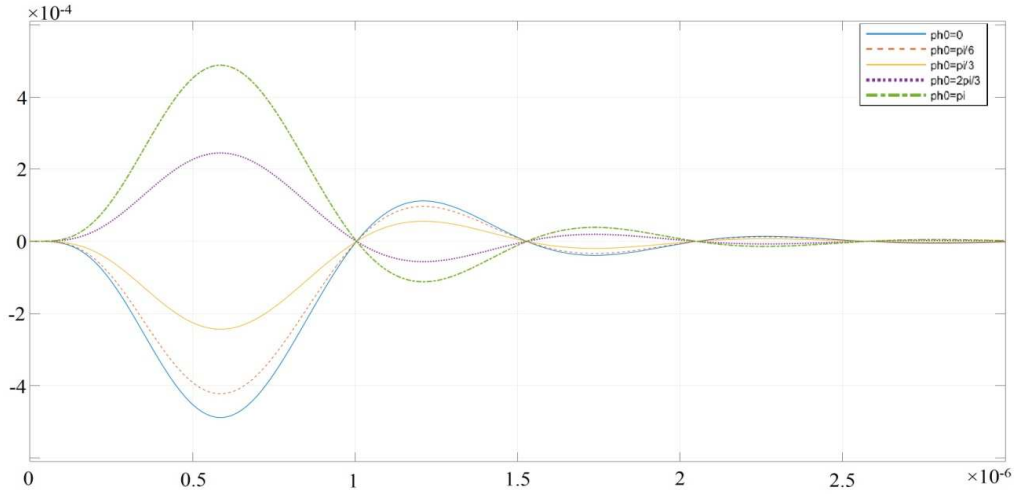


Рис. 6. График зависимости фазовых ошибок от времени при различных значениях начальных фаз

Далее при имитационном моделировании учитывались только влияние частоты среза ФНЧ (в составе фазовых детекторов), при этом на входе генераторов подают сигналы с начальной фазой равны нулю. На рис. 7 представлены результаты имитационного моделирования.

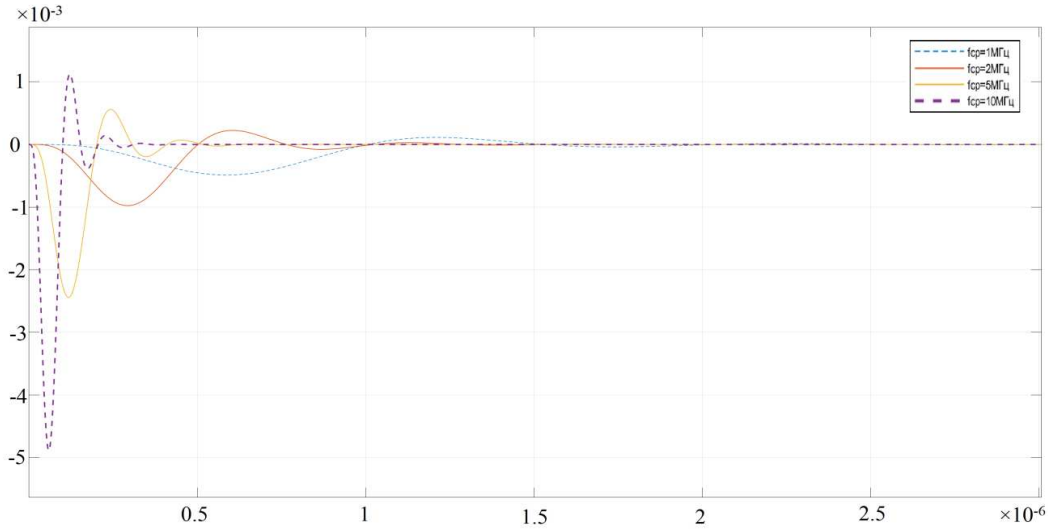


Рис. 7. График зависимости фазовых ошибок от времени при различных значениях частоты среза ФНЧ

Из графиков видно, что при различных значениях частоты среза ФНЧ фазовая ошибка прямо пропорциональна частоте среза ФНЧ и стремится к нулю через 2…3 микросекунды, то есть система синхронизирована. Схема работает устойчиво и время для синхронизации не зависит от значения начальной фазы генераторов, фазовый сдвиг компенсируется. Сигнал синхронизации управляемый, не зависит от уровня шумы.

С помощью предложенной имитационной модели может быть обеспечен различный, в том числе и высокий, уровень детализации моделируемых процессов. При этом модель создается поэтапно, эволюционно.

Заключение. Космическая информация используется для решения многих хозяйственных и научных задач мониторинга окружающей среды. Качество этой информации во многом определяется слаженностью работы всех систем, составляющих спутниковую группировку. Обеспечение такой согласованности невозможно без комплексной синхронизации (временной, пространственной и фазовой), один из предложенных методов, который может решить проблему синхронизации, рассмотрен в работе.

На космических аппаратах передатчик и приемник летят на различных платформах и используют независимые генераторы, поэтому фазовые помехи не подавляются. Качество сигнала в большей степени определяется качеством опорного сигнала в центральном блоке. Однако, характеристики сигнала будут зависеть от характеристик среды передачи и от качества составляющих подсистем, используемых для построения схемы синхронизации. Таким образом, эффективность системы должна быть промоделирована в зависимости от свойств канала и подсистемы синхронизации.

Список литературы

1. Juan Carlos Merlano Duncan, «Phase Synchronization Scheme for Very Long Baseline Coherent Arrays», 2012. 197 c.

2. Younis M., Krieger G., Metzig R., and Werner M. TanDEM-X bistatic synchronization system performance. German Aerospace Center, Microwaves and Radar Institute. Tech. Note TDX-TN-DLR-1102, 2005.

3. Голуб В. Система ФАПЧ и ее применения. Chip News. 2000. № 4. 15 с.

4. Веремеенко К.К., Тихонов В.А. Навигационно-посадочный комплекс на основе спутниковой радионавигационной системы // Радиотехника, 1996, № 1. 23 с.

5. Chen S. et al.: Focusing of tandem bistatic SAR data using the chirp-scaling algorithm // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2013, № 1. P. 1 - 13.

6. Wang W.-O. Measurement of Baseline and Orientation between Distributed Aerospace Platforms. Hindawi Publishing Corporation The ScientificWorld Journal Volume 2013, Article ID 985601.

7. Younis M. et al.: Performance Prediction and Verification for Bistatic SAR Synchronization Link. 2006. 4 p.

Нгуен Суан Чыонг, аспирант, xuantruong19@hotmail.com.vn, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DUAL-FREQUENCY SYNCHRONIZATION OF DISTRIBUTED GENERATORS IN SATELLITE SYSTEMS

Nguyen Xuan Truong

This paper presents analysis of one of the methods for synchronizing the carrier of master oscillators, spaced apart - a two-frequency synchronization scheme. The design methodology is based on the developed dual-frequency synchronization scheme. The conditions for phase stabilization, the influence of additional factors on the synchronization system are considered and evaluated.

Key words: synchronization methods, phase synchronization.

Nguyen Xuan Truong, postgraduate, xuantruong19@hotmail.com.vn, Russia, Tula, Tula State University

УДК 623-1/-8; 623.1/.7

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРА РЛС

Н.В. Ивахно, А.В. Гладких, С.И. Зыкин

Предложена методика формирования алгоритма определения достоверности данных, представляемых человеку-оператору радиолокационной станции, что дает возможность при минимальных аппаратно-программных затратах выполнить заданную задачу в предельно короткие сроки и с максимально возможной эффективностью.

Ключевые слова: достоверность данных, нечеткая логика, функция принадлежности, принятие решения, объем вычислений.

Создание автоматизированных систем управления (АСУ) нового поколения, позволяющих выполнить задачи по обнаружению объектов противника в предельно короткие сроки и с максимально возможной эффективностью невозможно без проведения интеллектуализации основных компонентов АСУ, к которым относится радиолокационная станция. Известно, что задача подавления артиллерийских подразделений противника будет успешно решаться, если весь цикл выполнения аналитических задач займет не более 3...4 минут. Эти обстоятельства предъявляют дополнительные повышенные требования к аппаратуре оператора РЛС.

В настоящее время накоплен большой опыт исследований по влиянию различных дестабилизирующих факторов на работу оператора системно-сложного устройства, который показывает, что оператор не в состоянии контролировать большое количество переменных факторов в условиях быстро меняющейся боевой обстановки и жестких временных ограничений. Возможности человека-оператора, обеспечивающего прием, передачу и переработку информации, можно оценить такими цифрами:

пропускная способность зрительного канала до 54 бит/сек;

частота восприятия последовательности сигналов до 10 Гц;

средняя скорость выполнения простых операций без тренировки не более двух операций в секунду;

запаздывание передачи информации 1... 1,5 с.

Развитие новой элементной базы позволяет уже сегодня рассмотреть вопрос по сокращению сроков принятия решения оператором и командиром РЛС и снизить трафик радиоканала за счет интеллектуализации рабочего места.

Интеллектуализация рабочего места оператора (РМО) предполагает использование математического аппарата, основанного на «мягких» вычислениях, основной принцип которых заключается в обеспечении приемлемого, не обязательно оптимального принятого решения в условиях неопределенности и при невысоком уровне затрачиваемых ресурсов (временных, вычислительных и т.п.). Построение нечетких систем (fuzzy-систем) основано на имитации действий человека-оператора при помощи ЭВМ. При этом используются лингвистические переменные, описывающие входную ситуацию на качественном уровне, задаются на некоторой количественной шкале, при помощи которой определяются степени соответствия входных и выходных данных рассматриваемым понятиям. Для этого используются функции принадлежности, принимающие значения от 0 до 1.

На качество работы нечетких систем влияют следующие основные факторы: количество термов входных и выходных переменных; вид функций принадлежности нечетких переменных, составляющих терм - множества лингвистических переменных; характер нечеткого соответствия между пространством предпосылок и пространством заключений; способ дефаззификации;

Для решения реальных задач достаточно иметь 5...12 (обычно используют 7±2) значений лингвистических переменных, от количества которых зависит среднеквадратичная ошибка интерпретации (рис. 1). Как показывает опыт решения задач по прогнозированию с использованием математического аппарата теории нечетких множеств, погрешность интерпретации при увеличении количества точек разбиения лингвистической переменной до 100 уменьшается всего на 2…3 %.

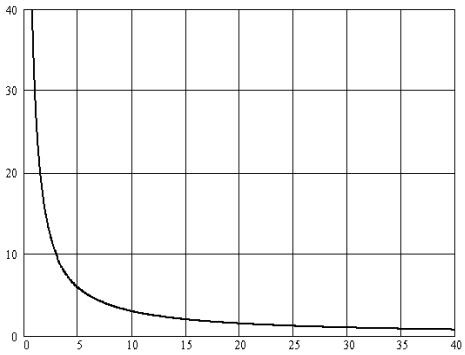


Рис. 1. Зависимости среднеквадратичной ошибки интерпретации от количества точек разбиения значений лингвистической переменной

Степень достоверности передаваемой информации в процессе ведения наблюдения РЛС зависит от множества факторов. Очевидно, что вероятность расположения противника для различных классов стреляющих систем на водных акваториях, в лесу, на болотах, в тылу, за линией боевого соприкосновения различна. Комплексный показатель достоверности информации будет определен набором следующих лингвистических переменных: ошибки, полученные в результате сопровождения боеприпасов на траектории; расположение войск противника; топографические данные (озеро, водохранилище, пруд, река, скорость течения, берег илистый, берег обрывистый, броды, плотины, острова, мели, болото непроходимое, болото проходимое, лес густой высокий, лес густой низкорослый, лес вырубленный, лесная дорога и т.д.); интенсивность стрельбы с района разведанной цели; калибр, габариты и масса стреляющей системы; расположение огневых позиций противника в тылу наших войск.

Решение данной задачи основано на использовании лингвистического описания процесса определения достоверности разведданных.

Логическое устройство по определению достоверности данных предполагается реализовать в виде логико-лингвистической модели. Нечеткое логическое устройство определения данных (НЛУОД) характеризуется множеством входных и выходных переменных, определяющих структуру НЛУОД; множеством лингвистических правил (нечетких рассуждений); нечетким языком (рис. 2).

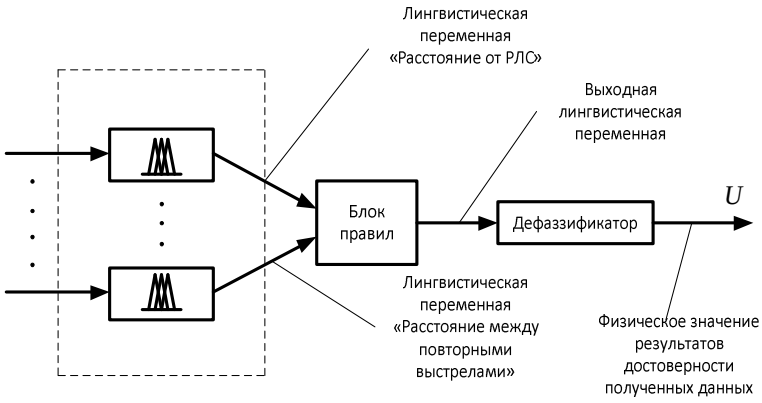


Рис. 2. Структурная схема нечеткого логического устройства определения данных

В качестве входных параметров в НЛУОД используются следующие лингвистические переменные: расстояние объектов поражения (ОП) от РЛС; расстояние от водной акватории; ошибки сопровождения; расстояние между ОП района разведанной цели.

В качестве выходной переменной выбирается переменная, полученная в результате обработки лингвистических переменных блоком лингвистических правил, входящих в базу знаний. Множество лингвистических правил, как было указанно выше, задается экспертом исходя из личного опыта в виде совокупности нечетких предикативных правил.

1. If (input1 is mf3) and (input2 is mf5) and (input3 is mf1) and (input4 is mf1) then (output1 is mf5) (1)

2. If (input1 is mf3) and (input2 is mf5) and (input3 is mf1) and (input4 is mf2) then (output1 is mf5) (2)

3. If (input1 is mf3) and (input2 is mf5) and (input3 is mf2) and (input4 is mf2) then (output1 is mf5) (3)

4. If (input1 is mf4) and (input2 is mf5) and (input3 is mf2) and (input4 is mf2) then (output1 is mf5) (4)

...

61. If (input1 is mf1) and (input2 is mf1) and (input3 is mf4) and (input4 is mf4) then (output1 is mf1) (61)

62. If (input1 is mf1) and (input2 is mf2) and (input3 is mf4) and (input4 is mf4) then (output1 is mf1) (62)

63. If (input1 is mf1) and (input2 is mf1) and (input3 is mf5) and (input4 is mf4) then (output1 is mf1) (63)

64. If (input1 is mf1) and (input2 is mf2) and (input3 is mf5) and (input4 is mf4) then (output1 is mf1) (64)

Здесь input1, input2, input3, input4 – входные переменные, output1- переменная вывода.

Знания эксперта «input1..input4» → «output1» отражает нечеткие причинные отношения предпосылки и заключения. Знак → обозначает нечеткую импликацию. В качестве алгоритма нечеткого вывода используется алгоритм Мамдани (Mamdani). Для приведения к четкости (дефаззификации) обычно используется центроидный метод (дефаззификации относительно среднего центра). По каждой стреляющей системе строится НЛУОД: миномет, гаубица, РСЗО. В качестве функций принадлежности с учетом возможной реализации на существующей элементной базе используем наиболее характерные и просто реализуемые треугольные функции принадлежности, которые в общем случае задаются аналитическим выражением:

$$f_{\Delta}(x,a,b,c)=\begin{cases}0, x\le a\\ \dfrac{x-a}{b-a}, a\le x\le b\\ \dfrac{c-x}{c-b}, b\le x\le c\\ 0, c\le x\end{cases}$$

где *a, b, c* –некоторые числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения и упорядоченные отношением: $a\le b\le c$. Параметры *a* и *c* характеризуют основания треугольника, а параметр *b*-его вершину. В качестве типичного примера реализации НЛУОД (рис. 3) выбрана стреляющая система миномет, определяемая 4 логическими переменными input1,…,input4, 64 логическими правилами и одной выходной переменной output1.

На рис. 4 лингвистические переменные (ЛП) принимают следующие значения:

*mf*3- ЛП принимает значение «очень хорошо»,

*mf*4- ЛП принимает значение «хорошо»,

*mf*5- ЛП принимает значение «средне»,
*mf*2- ЛП принимает значение «плохо»,
*mf*1- ЛП принимает значение «очень плохо».
Таким же образом строятся другие значения входных переменных.

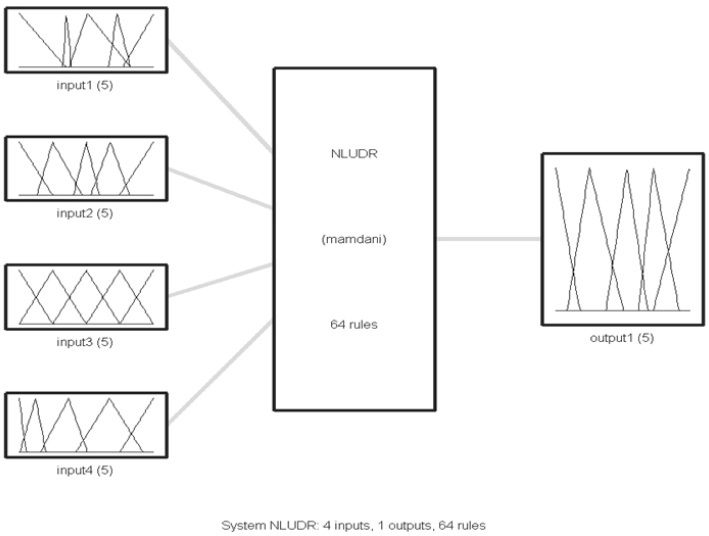


Рис. 3. Логическое устройство по определению достоверности данных. Лингвистическая входная переменная input1 рис 4 (ЛП) - расстояние огневой позиции миномет от РЛС

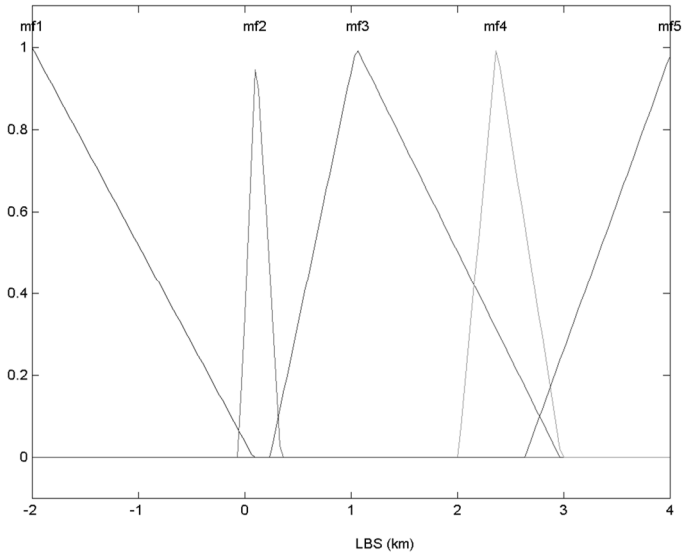


Рис. 4. Функции принадлежности лингвистической переменной «расстояние ОП миномет противника до базы»

Выходная лингвистическая переменная рис. 5, задается экспертом с помощью таблицы состоящей из 64 логических правил над 4 логическими переменными *input1,…,input4*. Достоверность результатов разведки определяется выполненными операциями над входными лингвистическими переменными заданных правил и значениями выходной функции принадлежности. Для наглядности работы НЛУОД, зафиксируем значения входных данных для ЛП «ошибки сопровождения РЛС траектории мины» на величине 0,1 и «Расстояние между ОП района разведанной цели» на величине ≥ 500 м. На рис. 6 получим результирующий график достоверности данных в зависимости от «расстояние ОП миномет противника до базы» и «расстояние от водной акватории до огневой позиции» при двух фиксированных переменных.

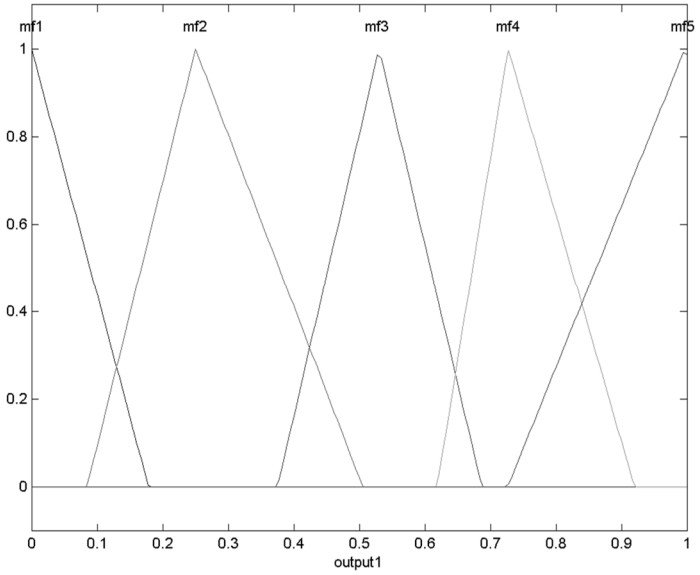


Рис. 5. Функции принадлежности выходной ЛП

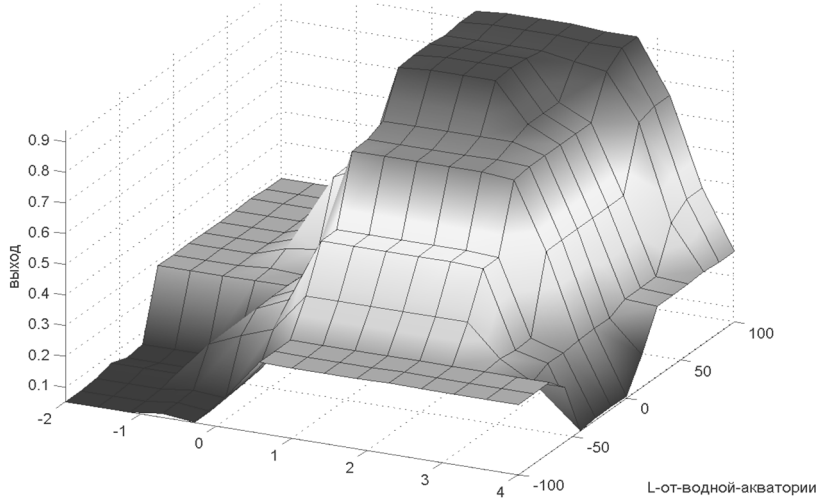


Рис. 6. Дефаззификация выходной переменной (при фиксированных ЛП input3 и input4)

Для реализации НЛУОД в рабочем месте оператора должна вестись база данных РЛС, которая выполняет следующие функции: пополняет базу знаний алгоритма НЛУОД; обеспечивает взаимную синхронизацию общих данных; обеспечивает произвольную выборку данных; обеспечивает укрупнение (группирования) объектов противника; обеспечивает учет анализируемых сведений; обеспечивает РЛС единой нумерацией объектов; проводит контроль актуальности данных об объектах; обеспечивает оперативный доступ к данным.

Разработана обобщенная методика интеллектуальной поддержки деятельности оператора перспективной РЛС, позволяющая повысить эффективность выполнения оператором задач по определению степени достоверности данных и дает возможность при минимальных аппаратно-программных затратах выполнить задачу по поражению объектов противника в предельно короткие сроки и с максимально возможной эффективностью.

Список литературы

1. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990. 271 с.

2. Поспелов Д.А. Искусственный интеллект. Книга 2 Модели и методы. М.: Радио и связь, 1990. 304 с.

3. Борисов А.Н., Алексеев А.В., Меркурьева Г.В., Сладзь Н.Н., Глушков В.И. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. М.: Радио и связь, 1989. 304 с.

4. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. С.Петербург БХВ-Петербург, 2003. 719 с.

Ивахно Наталия Валериевна, д-р техн. наук, профессор, natalia_iv@list.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Гладких Антон Викторович, начальник отдела, ipx71@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Зыкин Сергей Игоревич, аспирант, zykin.s.i@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

INTELLIGENT SYSTEM SUPPORTING THE ACTIVITIES OF THE RADAR OPERATOR

N. V. Ivakhno, A.V. Gladkikh, S.I. Zykin

A method is proposed for forming an algorithm for determining the reliability of data presented to a human operator of a radar station, which makes it possible to perform a given task in the shortest possible time and with the maximum possible efficiency with minimal hardware and software costs.

Key words: data reliability, fuzzy logic, membership function, decision making, amount of calculations.

Ivakho Natalia Valerievna, doctor of technical science, professor, natalia_iv@list.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Gladkikh Anton Viktorovich, head of department, ipx71@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Zykin Sergey Igorevich, postgraduate, zykin.s.i@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 623.462.122

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНО-МОДЕЛИРУЮЩЕГО СТЕНДА ДЛЯ ОТРАБОТКИ СПЕЦИАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Ю.Б. Подчуфаров, П.С. Голюдов, Д.В. Сафронов

В статье рассмотрены варианты реализации комплексно-моделирующего стенда для проверки и отладки программных продуктов на этапе их разработки.

Ключевые слова: комплексно-моделирующий стенд, специальное программное обеспечение, программные имитаторы, информационное взаимодействие.

Перспективные образцы вооружения разрабатываются не только на основе передовой электронно-компонентной базы, но и с использованием новейших версий программного обеспечения, которое в свою очередь является связующим звеном между

«железом» и человеком-оператором. Помимо этого, именно программные средства, в большей степени, обеспечивают качество выполняемых военной техникой задач. Разработка и отладка специального программного обеспечения (СПО) достаточно трудоемкий процесс. Для упрощения разработки программных модулей обычно используют специализированные комплексно-моделирующие стенды (КМС), соответствующие по своим характеристикам реальным техническим средствам, для которых разрабатывается СПО.

Условно, КМС можно разделить на три группы:

1) для проверки отдельно взятой программы;

2) для проверки взаимодействия вновь разрабатываемого программного модуля с другими сопрягаемыми программными продуктами одного технического средства;

3) для проверки взаимодействия вновь разрабатываемого программного модуля одного технического средства с программными продуктами другого (сопрягаемого) технического средства.

Для организации КМС 1 и 2 группы достаточно иметь персональный компьютер (ПК) с установленным в него проверяемого СПО и, при необходимости, взаимодействующих программных продуктов (рис. 1).

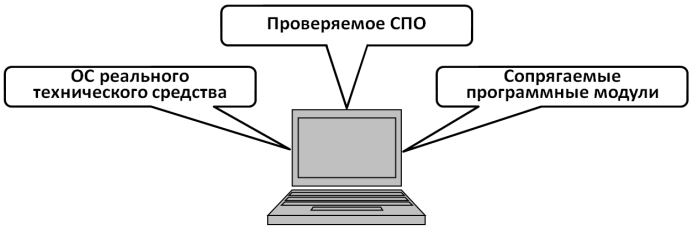


Рис. 1. Пример стенда для проверки работоспособности и отладки СПО

КМС для проверки информационного взаимодействия между сопрягаемыми техническими средствами может быть организован несколькими способами:

а) на одном ПК с использованием программных имитаторов сопрягаемых технических средств;

б) на нескольких соединенных в одну сеть ПК, с использованием программных имитаторов сопрягаемых технических средств;

в) на ПК и реальном образце технического средства, соединенных в одну сеть.

В первом случае достаточно иметь ПК с установленными в него: операционной системы (ОС) реального технического средства, программных имитаторов сопрягаемых систем, проверяемого СПО. Для имитации физического сопряжения необходимо наличие хотя бы двух незадействованных портов USB. Для имитации сопряжения по специальным интерфейсам (RS-232, RS-422, RS-485) необходимо использовать соответствующие адаптеры (рис. 2).

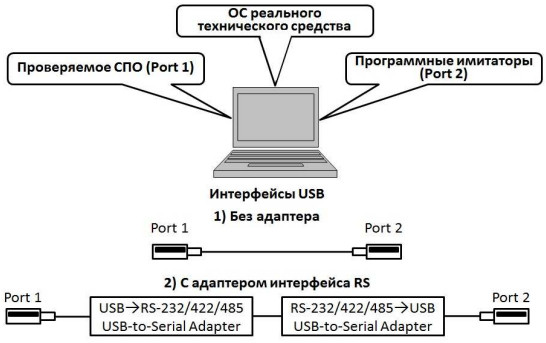


Рис. 2. Пример КМС для проверки работоспособности и отладки СПО с использованием программных имитаторов

КМС для проверки информационного взаимодействия на нескольких соединенных в одну сеть ПК, с использованием программных имитаторов сопрягаемых технических средств, представлен на рис. 3.

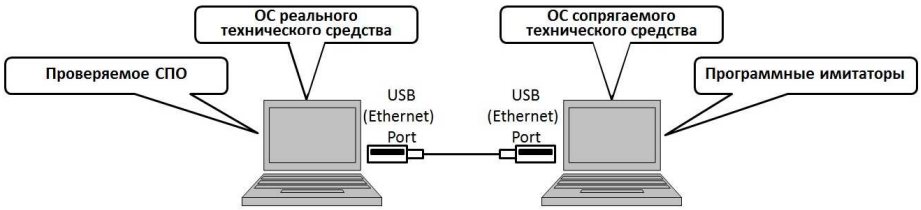


Рис. 3. Пример КМС на нескольких соединенных в одну сеть ПК с использованием программных имитаторов

Преимущество представленного на рис. 3 КМС в том, что появляется возможность проверки информационного обмена по высокоскоростному интерфейсу Ethernet, используемому для передачи больших массивов данных.

С использованием выше представленных КМС разработчик может оценить качество программных модулей, а также выявлять недоработки СПО с целью их оперативного устранения. Однако нельзя однозначно быть уверенным, что проверяемый на КМС программный продукт будет с тем же успехом функционировать на реальном образце. Для того, чтобы проверять СПО в максимально приближенных к реальным условиях эксплуатации, необходимо привлекать к стендовым проверкам реальные образцы технических средств (рис. 4).

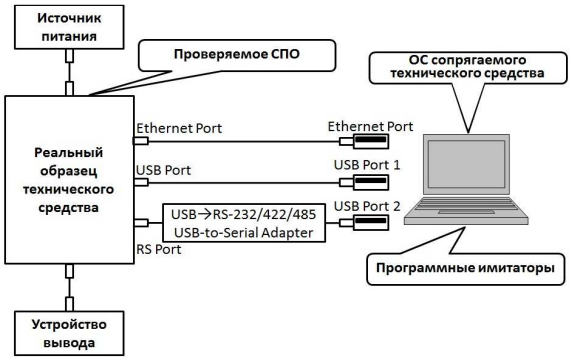


Рис. 4. Пример КМС для проверки работоспособности и отладки СПО с использованием реального образца технического средства

Представленный на рис. 4 КМС использовался для проверки и отладки СПО цифровой вычислительной машины, что позволило существенно сократить объем полигонных испытаний разрабатываемого комплекса и обеспечило качественную отработку средств управления на всех стадиях проектирования.

Список литературы

1. Хохлов Н.И., Подчуфаров Ю.Б., Подчуфаров А.Ю., Ларин Д.В., Ларин А.В., Митрофанова Н.С., «Специальное программное обеспечение комплексов управляемого вооружения»: учеб. пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 176 с.

Подчуфаров Юрий Борисович, д-р техн. наук, профессор, начальник отделения, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»,

Голюдов Павел Сергеевич канд. техн. наук, начальник отдела, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»,

Сафронов Денис Вадимович, инженер исследователь 1 категории, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»

DEVELOPMENT OF THE COMPLEX MODELLING STAND FOR WORKING OFF OF THE SPECIAL SOFTWARE

Y.B. Podchufarov, P.S. Goliudov, D.V. Safronov

In article options of realization of the complex modeling stand for check and debugging of software products at a stage of their development are considered.

Key words: the complex modeling stand, the special software, program simulators, information exchange.

Podchufarov Iuriy Borisovich, doctor of technical sciences, professor, head of department, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Goliudov Pavel Sergeyevich, candidate of technical sciences, head of department, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Safronov Denis Vadimovich, research engineer of 1 category, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP»

УДК 621.453/457

НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ДАЛЬНОСТИ СТРЕЛЬБЫ УПРАВЛЯЕМЫХ РЕАКТИВНЫХ СНАРЯДОВ СИСТЕМ ЗАЛПОВОГО ОГНЯ

В.С. Асташов, С.Н. Грушичев, А.С. Иванов, А.А. Поляков

Определены технические задачи, решение которых необходимо для создания новых управляемых реактивных снарядов (УРС), обеспечивающих повышение точности и дальности стрельбы существующих образцов. Анализируется существующий подход к выбору рациональных параметров конструкции УРС. Описана конструкция составных частей снаряда, их принцип работы. Приведены и обоснованы конструктивные преимущества вновь создаваемого блока системы управления (БСУ) перед существующими аналогами.

Ключевые слова: реактивный снаряд, система управления, ракетный двигатель, РСЗО, боевая машина, блок системы управления.

Разнообразие целевых задач, решаемых войсками в период боевых действий, совершенствование средств противоракетной обороны противника, а также изменение военной доктрины ведущих мировых держав требуют постоянного повышения боевых качеств реактивных систем залпового огня (РСЗО).

Важным и актуальным направлением повышения эффективности действия РСЗО у цели является модернизация снарядов, направленная на повышение дальности и точности стрельбы. В перспективных отечественных РСЗО такой подход был реализован за счёт использования в реактивных снарядах (РС) системы управления (СУ), построенной на базе бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), которая комплексирована с бортовой аппаратурой потребителей глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), обеспечивающей управление движением РС на всей траектории полета. При этом были сохранены габаритно-массовые характеристики РС и внутрибалистические характеристики ракетной части (РЧ).

Теоретический анализ и опыт конструкторской отработки при создании перспективных УРС для РСЗО позволяет утверждать, что дальнейшее существенное улучшение характеристик дальности и точности стрельбы может быть обеспечено посредством модернизации РЧ и БСУ.

Как известно, основными конструктивными элементами традиционной РЧ является двигатель и блок стабилизаторов (БС). При этом в большинстве практических разработок РС используют РД на твердом топливе. Он по сравнению с другими двигателями (жидкостным ракетным двигателем и гибридным ракетным двигателем) имеет простое устройство. Размещение твердого топлива в камере сгорания позволяет исключить из конструкции двигателя топливные баки, трубопроводы, систему подачи и упростить использование стартового оборудования. Одновременно несомненным достоинством РДТТ является технологичность конструкции, низкая стоимость изготовления, постоянная готовность к пуску, возможность длительного хранения на складе и в полевых условиях. При этом, в зависимости от назначения двигательной установки (ДУ), особенностей компоновки РС, требований по ограничению его габаритов и учета заданного режима изменения тяги используются различные конструктивные схемы РДТТ.

Практическая реализация конструктивных схем ДУ в конструкции перспективных УРС РСЗО показывает, что в существующих габаритах обеспечивается максимально возможная дальность, достигаемая одновременно с применением СУ и возможностью подпланирования снаряда на пассивном участке траектории. Поэтому дальнейшее совершенствование РСЗО связанно с использованием многорежимных двигательных установок и возможностью проектирования и применения прямоточных ракетных двигателей.

Учитывая сложность отработки конструкции прямоточного РД, целесообразно, в первую очередь, рассмотреть перспективность практического использования двухрежимного двигателя. Такой подход обеспечивает возможность получения существенного прироста дальности стрельбы как за счет работы двигателя с временной паузой, так и сохранения минимальной дальности на уровне перспективных РСЗО при функционировании двигателя с задействованием только первого режима.

Одновременно, для повышения устойчивости движения на траектории, снаряд снабжен блоком стабилизаторов (рис. 1), обладающим возможностью проворота относительно продольной оси траектории движения. Он включает в себя корпус 1, пружины 3, лопасти аэродинамических стабилизаторов 4, подшипники 6, входной 5 и выходной конус 2. Размещение подшипников реализовано на одной базе. Это позволяет обеспечить постоянную величину соосности колец подшипников и при окончательной сборке блока компенсировать моменты трения. Реализация такого конструктивного подхода позволит компенсировать моменты крена, создаваемые стоком потока с передних поверхностей снаряда.

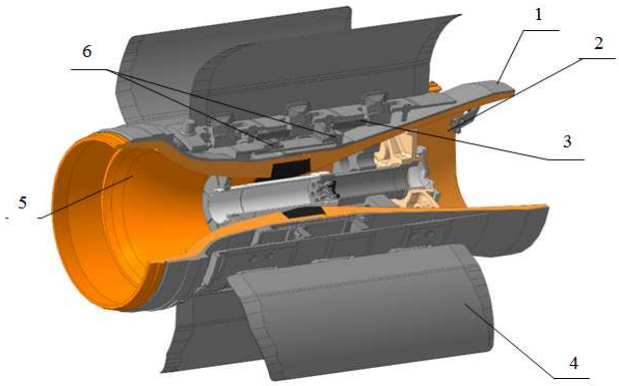


Рис. 1. Конструктивно-компоновочная схема проворачивающегося блока стабилизаторов

Практическое использование проворачивающегося БС обеспечивает управляемость в канале крена УРС, выполненного по аэродинамической схеме «утка». Такой БС компенсирует потерю точности наведения снаряда из за несимметричного стока потока с передних поверхностей снаряда, зависящих от углов атаки α, скольжения β, отклонения органов управления $\delta_в$, $\delta_н$ (рис. 3).

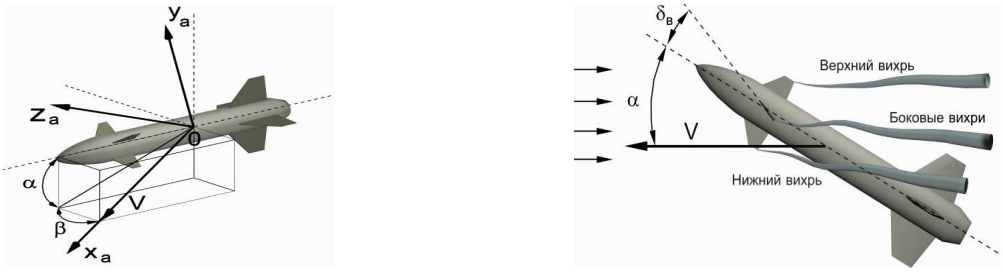


Рис. 2. Скоростная система координат и схемы вихрей набегающего потока при $\alpha \neq 0, \delta_в \neq 0, \delta_н \neq 0$***, β=0***

Инженерная практика показывает, что увеличение дальности стрельбы требует повышения точности стрельбы и применения высокоточных СУ. По принципу действия они разделяются на автономные, гироскопические, инерциальные, астронавигационные и комбинированные.

Наибольшее практическое применение среди разработок для РС РСЗО нашли системы управления, построенные на базе бесплатформенной инерциальной навигационной системы. Они дают полную информацию о навигационных параметрах движения снаряда – углах курса, тангажа, крена, о значениях ускорения, скорости движения и координат, имеют сравнительно малые габаритные характеристики и позволяют обеспечить рациональную компоновку разрабатываемого снаряда в заданных калибрах. При этом они почти автономны и требуют минимум внешней информации.

На рис. 3 изображена конструктивно-компоновочная схема БСУ, размещённого в передней части УРС и состоящего из блока управления приводами 1, блока рулевых приводов 2, инерциальной системы управления 3, источника тока с термохимическими батареями 4, аэродинамических рулей 6, бортовой аппаратуры потребителя глобальных навигационных спутниковых систем 5. На практике модернизированный блок системы управления на основе бесплатформенной инерциальной навигационной системы с лазерным гироскопом в качестве датчика угловых скоростей представляет собой конструктивно и функционально законченный узел. Он включает в себя инерциальную систему управления, компенсированную помехозащищенной бортовой аппаратурой потребителей (БАП) ГНСС, принимающей сигналы навигационных спутников в двух диапазонах (вместо одного) и передающей информацию на блок приемовычислителя. При этом, главный распределитель подает команду на аэродинамические органы управления и через блок управления приводами электропитание поступает на всей траектории полета от источника тока с термохимическими батареями. Данная конструкция свободно размещается в носовой части УРС в виде отдельного блока системы.

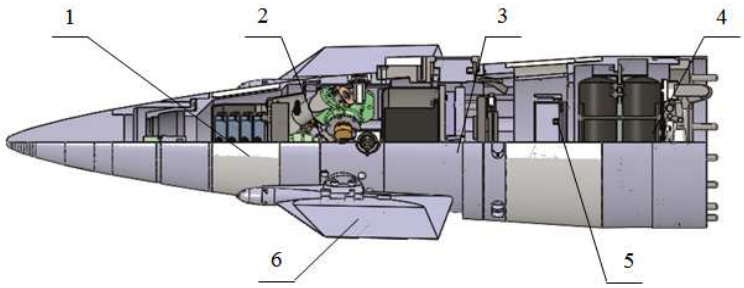


Рис. 3. Конструктивно-компоновочная схема блока системы управления УРС

За счет применения современной элементной базы, в модернизированном БСУ возможна реализация новых алгоритмов формирования траекторий, стабилизации и наведения для устойчивого полета снаряда, которые обеспечивают требуемый диапазон дальностей и точности стрельбы. Возможно так же более компактное размещение составных частей БСУ, что позволит изменить геометрическую форму обтекателя, обеспечить меньшее лобовое сопротивление и повысить дальность полета снаряда.

Таким образом, в результате выполнения исследовательской работы проведена оценка возможности использования модернизированных составных частей в перспективном УРС РСЗО, способных на текущий момент обеспечить существенную прибавку к дальности и точности стрельбы РСЗО.

Исполнение ракетной части в составе двухрежимного двигателя, включающего проворачивающийся блок стабилизатора, в сочетании с работой инерциальной системы управления, позволяет получить не только значительный прирост к дальности стрельбы в 1,5-1,7 раза, но и делает возможным поражение малоразмерных точечных целей с точностью не ниже, чем у оперативно-тактического вооружения. Как показывает предварительная оценка в этом случае реализуется более выгодное соотношение цена-эффективность, что снижает материальные затраты на решение боевой задачи.

Компоновка блока системы управления на основе бесплатформенной инерциальной навигационной системы с использованием новых алгоритмов формирования траекторий, стабилизации и наведения позволяет обеспечить управление снаряда на всей траектории полета и повысить точность доставки боеприпаса в цель.

Повышение точности стрельбы в 3-7 раз (в зависимости от условий боевого применения) обеспечивается путем совершенствования аппаратуры потребителей глобальных навигационных систем, способной принимать сигналы спутников в нескольких диапазонах частот, вместо одного.

Список литературы

1. Физические основы устройства и функционирования стрелково-пушечного артиллерийского и ракетного оружия. Часть 2. Физические основы устройства и функционирования ракетного оружия: учебник для вузов / [Буланов И.М. И др.]; под. ред. проф. В.В. Ветрова и проф. В.П. Строгалева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. 784 с.

2. Беспилотные летательные аппараты / Под ред. Л.С. Чернобровкина. М.: Машиностроение, 1967. 440 с.

3. Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1973. 616 с.

4. Беспилотные летательные аппараты. Основы устройства и функционирования / [П.П. Афанасьев и др.]; под ред. Голубева И.С., Туркина И.К. Изд. Второе, переработанное и дополненное. М., 2008. 656 с.

5. Оборонная техника: сборник / под ред. И.Б. Гаривадского. М.: НТЦ «Информтехника», 2005. 126 с.

Асташов Владислав Сергеевич, инженер – конструктор 3 категории, astashov-92@mail.ru, Россия, Тула, АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева»,

Грушичев Сергей Николаевич, ведущий инженер – конструктор, astashov-92@mail.ru, Россия, Тула, АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева»,

Иванов Алексей Сергеевич, инженер – конструктор 1 категории, astashov-92@mail.ru, Россия, Тула, АО «КБП»,

Поляков Александр Алексеевич, инженер, sashka.poliackov@yandex.ru, Россия, Тула, АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева»

DIRECTIONS FOR IMPROVING THE ACCURACY AND FIRING RANGE OF GUIDED MISSILES MULTIPLE LAUNCH ROCKET SYSTEMS

V.S. Astashov, S.N. Grushichev, A.S. Ivanov, A.A. Polyakov

The technical problems that need to be solver in order to create new guided missiles (URS) that provide an increase in the accuracy and firing range of existing samples are identified. The existing approach to the choice of rational parameters of the URS design is analyzed. The design of the components of the projectile and their principle of operation are described and justifies the design advantages of the newly created control system unit (BSU) over existing analogues.

Key words: rocket projectile, control system, rocket engine, MLRS, combat vehicle, control system unit.

Astahov Vladislav Sergeevich, design engineer III category, astashov-92@mail.ru, Russia, Tula, JSC «SPLAV Scientific and Production Association» named after A. Ganichev»,

Grushichev Sergey Nikolaevich, lead design engineer, max0594@yandex.ru, Russia, Tula, JSC «SPLAV Scientific and Production Association» named after A. Ganichev»,

Ivanov Aleksey Sergeevich, design engineer I category, max0594@yandex.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Polyakov Aleksandr Alekseevich, engineer, sashka.poliackov@yandex.ru, Russia, Tula, JSC «SPLAV Scientific and Production Association» named after A. Ganichev»

УДК 615.47; 616-072.7

СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ КОГНИТИВНЫХ НАРУШЕНИЙ

Н.Л. Коржук, А.Х. Мельников, А.Ф. Индюхин

В статье рассмотрен способ выделения из спонтанной биоэлектрической активности головного мозга когнитивной реакции на внешний стимул, требующий оценки зрительного образа и мысленной вербализации. Предложен способ визуализации вызванной активности, структурная схема системы использования полосовых фильтров и математическая модель картирования.

Ключевые слова: функциональная система, головной мозг, электроэнцефалограмма, полосовой фильтр, картирование.

Академик В.И. Вернадский отмечал, что возникновение нового понятия, «символа», нельзя понять логически, но можно приложить к нему математический анализ, проверить фактами, точно учесть их мерой и числом [1].

Согласно теории функциональных систем (ФС) академика П.К. Анохина [2, 3], который отводит головному мозгу роль управляющего элемента во всех, даже случайно возникающих под влиянием конкретной ситуации, функциональных системах, каждой системе соответствуют определенные связи и взаимодействие разных зон коры головного мозга (КГМ). Физически связи выражаются в электрической активности и синхронизации этой активности.

Структурная схема ФС, предложенная в [2], аналогична принятой в теории автоматического управления [4]: происходит сравнение текущего положения с желаемым (акцептор результата действия), а разница служит управляющим сигналом для исполнительного устройства (мышечной системы). Таким образом, ФС представляет собой замкнутую систему автоматического управления с отрицательной обратной связью.

Системообразующим фактором академик П.К. Анохин называл цель, желаемый результат, к которому стремится субъект. Современная наука вкладывает в это понятие несколько другой смысл, но определение классика нас привлекает тем, что четко показывает – конкретные функциональные системы могут включать в себя другие, сложившиеся эволюционно в более ранние сроки.

Исходя из латинского слова «cognito» - узнавание, назовем когнитивным актом познание какой-либо элементарной истины. Для совершения когнитивного акта в головном мозге, несомненно, создается новая функциональная система, назовем ее когнитивной системой (КС), целиком сосредоточенная в коре – без использования мышечной системы (в отличие от общего случая, рассматриваемого П.К. Анохиным в [2]). Возникновение ее возможно только при наличии мотивации, соответствующих способностей и целенаправленного действия человека. Внешние условия (обстановочная афферентация) формируют определенный заказ, потребность индивидуума, создают конфликтную ситуацию (пусковая афферентация). Постановка задачи может быть вполне конкретной.

Простейшим случаем ФС является процесс осознания какого-либо внешнего стимула. Методика исследования используется в медицине и психофизиологии под названием когнитивные вызванные потенциалы (ВП) [5 - 7].

В ходе эксперимента была проведена регистрация ЭЭГ с применением компьютерной диагностической системы «Нейрокартограф-5» (фирма МБН, г. Москва), установленной в Клинико-Диагностическом центре Тульской областной клинической больницы. Получены записи фоновой активности и записи с когнитивной нагрузкой. Испытуемым на экране ноутбука предъявлялись две фигуры – квадрат и круг. Задание состояло в том, чтобы оценить, какая из фигур занимает большую площадь и мысленно назвать ее. В результате оценки испытуемый мысленно произносил слово «круг» или «квадрат». В эксперименте участвовали студенты-спортсмены. В момент предъявления стимула импульсный генератор (выполнен на микроконтроллере stm32f103) по команде с ноутбука выдает синхроимпульс, который отображается на ЭЭГ. Генератор имеет два входных интерфейса – USB и RS232, что позволяет совмещать оборудование с другими медицинскими приборами. Запись обрабатывается программным обеспечением (язык программирования VB6, VB2008Express), в результате на экран выводится карта вызванной активности для соответствующего момента времени.

На рис. 1 представлена схема исследуемой в эксперименте исследуемой КС.

Приведенные на рис. 1 функциональные системы: ФС1 – система оценки площади наблюдаемой фигуры; ФС2 – система (база памяти) названий геометрических фигур; ФС3 – система формальной логики; ФС4 – система воспроизведения вербальных понятий (мысленное проговаривание). Указанные ФС локализуются в различных зонах КГМ, и их функционирование находит отражение в биоэлектрической активности мозга.

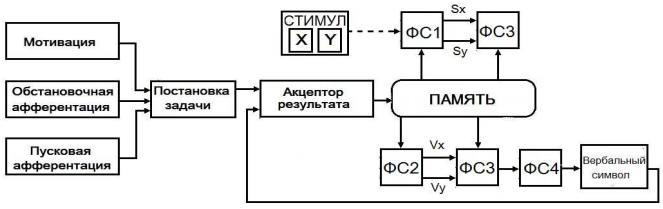


Рис. 1. Структурная схема КС: X, Y – компоненты визуального стимула; ФС1 – ФС4 – эволюционно более ранние функциональные системы; Sx, Sy – площади фигур; Vx, Vy – названия фигур

С медико-клинической точки зрения различают спонтанную (фоновую) и вызванную активность – ВП. Если первая используется чаще всего для диагностики грубой патологии, то вторая – для исследования сенсорных систем. Долгое время аппара-

тура для исследований ЭЭГ и ВП разной модальности также использовалась разная, не существовало единого методического подхода, вплоть до того, что результаты противоречили друг другу [8].

Амплитуда когнитивного ВП на порядок меньше фоновой ЭЭГ, к тому же методика регистрации предполагает многократную подачу значимого стимула, случайным образом чередующегося среди незначимых в соотношении 1 к 10. Используется усреднение по времени, вследствие чего значительная доля информации теряется, особенности ответа нервной системы на единичный стимул безвозвратно утрачиваются. Для изучения КС такая методика непригодна.

Для исследования КС предложен способ выделения единичной реализации когнитивного ВП, основанный на автоматической настройке математической модели фоновой ЭЭГ (в том числе и в реальном масштабе времени) [9]. Математическая модель состоит из рекуррентных уравнений цифровых полосовых фильтров с настраиваемой полосой пропускания и различными уровнями подавления высоких и низких частот [10]. Параметры фильтров автоматически изменяются в зависимости от частоты доминирующего ритма [11].

Фильтрация происходит следующим образом: сигнал подается на три последовательно соединенных полосовых фильтра Баттерворта БФ1, БФ2, БФ3. Каждый из фильтров имеет исходную частоту настройки f_H, соответствующую середине анализируемого частотного диапазона, например, тета, альфа, бета.

Полосовые фильтры БФ1, БФ2, БФ3 автоматически настраиваются на частоту доминирующего ритма в выбранном частотном диапазоне периодометрическим методом: счетчики измеряют временные интервалы между моментами прохождения выходными сигналами фильтров максимумов и минимумов. Частота настройки f_H рассчитывается как обратная величина по нескольким значениям измеренного периода.

На рис. 2 представлена блок-схема последовательного соединения полосовых фильтров.

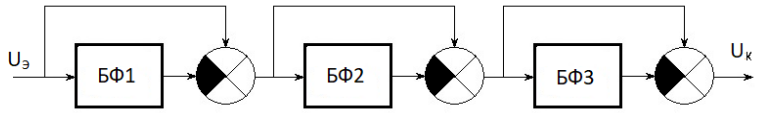


Рис. 2. Структурная схема обработки сигнала фильтрами: UЭ – сигнал ЭЭГ; UК – выходной сигнал когнитивной активности

Как видно из рис. 2, выходной сигнал фильтра БФ1 (настроен на альфа-диапазон) вычитается из исходного сигнала ЭЭГ, и на вход второго фильтра поступает сигнал, не содержащий альфа-ритма. Второй фильтр настроится на частоту тета- или бета-ритма – в зависимости от того, кто из них имеет большую амплитуду. Система из трех фильтров после завершения настройки подавит в сигнале ЭЭГ основные ритмы фоновой активности.

В то же время в выходных сигналах фильтров (а их может быть больше трех) содержится информация о спектральной картине фоновой активности ЭЭГ. Если рассматриваемые отведения входят в состав КС, то при ее работе эти отведения будут участвовать в синхронном процессе, и в регистрируемых сигналах будут иметь место общие частотные составляющие. Это будет выражаться в том, что в спектре сигналов в разных отведениях будут «всплески» на одной и той же частоте. Поскольку мы отказались от проведения спектральных преобразований, а ищем (настраиваемся) на частоты ритмов, мы должны получить одинаковые резонансные частоты фильтров Баттерворта в разных отведениях. По окончании настройки фильтров их параметры (количество их будет зависеть от соотношения амплитуд основных гармоник сигнала) с заданным уровнем точности будут представлять модель сигнала фоновой ЭЭГ в том смысле, что белый шум, пропущенный через систему построенных фильтров, будет иметь спектральные характеристики, совпадающие с характеристиками фоновой ЭЭГ.

Применение предложенного способа [9] позволяет регистрировать единичные реализации отклика на стимул и проследить локализацию максимума вызванной активности в различные моменты времени после подачи внешнего стимула и выявлять области, вовлеченные в наблюдаемый процесс [12]. Ранее отмечалось, что когнитивный ВП имеет несколько максимумов, наблюдаемых в разные моменты времени в разных зонах коры [6]. По мнению академика П.К. Анохина максимум ВП соответствует прохождению сигнала через определенную нервную структуру (центр). Вычислив положение мгновенного максимума вызванной активности, мы можем установить, в каком центре сейчас происходит обработка информации. В описываемом эксперименте КС имеет лингвистический выход в виде фонем и слов. В последнее время такие исследования, находящиеся на стыке нейролингвистики и электрофизиологии, проводятся опережающими темпами [13 - 15] ввиду их большого значения для развития методов коммуникации людей с ограниченными возможностями.

Картирование мгновенных значений ЭЭГ, довольно популярное в начале 90-х, не имеет в настоящее время широкого применения ни в медицинской, ни в исследовательской практике. Гораздо больший интерес представляет картирование ВП, однако традиционный метод регистрации ВП – накопление и усреднение сигналов с одного–двух электродов не позволяет получить сколь-нибудь значимый результат.

При нейрокартировании приняты следующие допущения:

1. Границы картируемой зоны проходят через электроды Fp1, F7, T3, T5, O1, O2, T6, T4, F8, Fp2.

2. Через электроды F3, C3, P3, Oz; F4, C4, P4, Oz; F7, T3, T5, O1; O2, T6, T4, F8 проходят дуги большого круга.

Процесс картирования осуществляется в каждый дискретный момент времени записи ЭЭГ (шаг $\Delta t = 0{,}005$ с) после цифровой фильтрации сигнала.

На плоскости картирования приняты следующие координаты электродов в круге радиусом ***r*** и координатами центра X_C, Y_C.

$$yef7 = yef8 = Yc - r \cdot \cos(0{,}5\pi);$$
$$xef7 = Xc - r \cdot \sin(0.3\pi); \quad xef8 = Xc + r \cdot \sin(0.3\pi);$$
$$yef3 = yef4 = Yc - r \cdot \cos(0{,}3\pi);$$
$$xef3 = Xc - 0{,}6r \cdot \sin(0{,}2\pi); \quad xef4 = Xc + 0{,}6r \cdot \sin(0{,}2\pi);$$
$$yet3 = yet4 = Yc; \quad xet3 = Xc - r; \quad xet4 = Xc + r;$$
$$yec3 = yec4 = Yc; \quad xec3 = Xc - 0{,}4r; \quad xec4 = Xc + 0{,}4r;$$
$$yet5 = yet6 = Yc + r \cdot \sin(0{,}2\pi);$$
$$xet5 = Xc - r \cdot \cos(0{,}2\pi); \quad xet6 = Xc + r \cdot \cos(0{,}2\pi);$$
$$yep3 = yep4 = Yc + r \cdot \sin(0{,}2\pi);$$
$$xep3 = Xc - 0{,}6r \cdot \sin(0{,}2\pi); \quad xep4 = Xc + 0{,}6r \cdot \sin(0{,}2\pi);$$
$$yeo1 = yeo2 = Yc + r \cdot \cos(0{,}1\pi);$$
$$xeo1 = Xc - r \cdot \sin(0{,}1\pi); \quad xeo2 = Xc + r \cdot \sin(0{,}1\pi);$$
$$yeoz = Yc + r; \quad xeoz = Xc;$$

где *yec3, xec3,xef7,yef7,xef3, yef3, xet3, yet3, xet5, yet5, xep3, yep3, xeo1, yeo1, yec4, xec4,xef8,yef8,xef4, yef4, xet4, yet4, xet6, yet6, xep4, yep4, xeo2, yeo2, xeoz, yeoz* – координаты соответствующих электродов.

Для определения значений сигналов ЭЭГ в межэлектродном пространстве последовательно применяется метод сплайн-интерполяции по четырем точкам.

1. Определяются значения сигналов ЭЭГ по «дугам большого круга» (допущение п.2) для точек пересечения дуг с секущей плоскостью, перпендикулярной плоскости симметрии головного мозга.

1.1. Координаты точек рассчитываются по положению секущей плоскости относительно лба – *yb*.

$$x_1 = Xc - \sqrt{r^2 - (Yc - yb)^2};$$

$$x_2 = \begin{cases} \dfrac{(yb - yec3)(xef3 - xec3)}{(yef3 - yec3)} + xec3 & yb < yec3, \\ \dfrac{(yb - yep3)(xec3 - xep3)}{(yec3 - yep3)} + xep3 & yb > yec3 \quad и \quad yb \le yep3, \\ \dfrac{(yb - yeoz)(xep3 - yeoz)}{(yep3 - yeoz)} + xeoz & yb > yep3 \quad и \quad yb \le yeoz; \end{cases}$$

$$x_3 = \begin{cases} \dfrac{(yb - yec4)(xef4 - xec4)}{(yef4 - yec4)} + xec4 & yb < yec4 \\ \dfrac{(yb - yep4)(xec4 - xep4)}{(yec4 - yep4)} + xep4 & yb > yec4 \quad и \quad yb \le yep4 \\ \dfrac{(yb - yeoz)(xep4 - xeoz)}{(yep4 - yeoz)} + xeoz & yb > yep3 \quad и \quad yb \le yeoz \end{cases}$$

$$x_4 = Xc + \sqrt{r^2 - (Yc - yb)^2}.$$

1.2. Определяются четыре значения сигналов на пересечении секущей плоскости с дугами большого круга. Обозначим буквой S функцию сплайн-интерполяции по четырем точкам [12].

$$u = S(x, x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4),$$

где x – координата расчетной точки; x_1, x_2, x_3, x_4 – координаты опорных точек, для которых заданы значения интерполируемых функций; y_1, y_2, y_3, y_4 – значения функций в опорных точках.

$$u1 = S(yb, yef7, yet3, yet5, yeo1, uf7, ut3, ut5, uo1);$$

$$u2 = S(yb, yef3, yec3, yep3, yeoz, uf3, uc3, up3, uoz);$$

$$u3 = S(yb, yef4, yec4, yep4, yeoz, uf4, uc4, up4, uoz);$$

$$u4 = S(yb, yef8, yet4, yet6, yeo2, uf8, ut4, ut6, uo2),$$

где *u1, u2, u3, u4* – значения сигналов ЭЭГ в точках пересечения секущей плоскости с дугами большого круга; *uf3, uf4, uf7, uf8, ut3, ut4, ut5, ut6, uc3, uc4, up3, up4, uo1, uo2, uoz* - значения сигналов ЭЭГ на соответствующих электродах, причем:

$$uoz = S(yoz, yet5, yeo1, yeo2, yet6, ut5, uo1, uo2, ut6).$$

2. Значения сигнала ЭЭГ в каждой точке сечения получаются по формуле [12]:

$$ux = S(x, x_1, x_2, x_3, x_4, u1, u2, u3, u4),$$

где *x* – координата точки в сечении; *ux* – значение сигнала ЭЭГ в точке *x*.

Значения сигналов во всех последовательных сечениях сохраняются в квадратной матрице размером 200*200 элементов. После заполнения матрицы осуществляется поиск глобального максимума и минимума. Интервал между максимумом и минимумом разбивается на шесть равных промежутков, в соответствии с которыми элементу присваивается соответствующий код цвета. Поскольку матрица квадратная, крайние элементы, выходящие за круглую зону картирования, признаков цвета не получают. Лобная зона карты не отображается ввиду использования этих каналов усилителя для подачи синхроимпульса.

На графическое поле программы выводится цветная карта, соответствующая дискретному моменту времени вместе со шкалой цветового масштаба, граничными значениями максимума и минимума сигнала для данного момента времени, а также время относительно момента подачи стимула.

На рис. 3 приведены две карты, соответствующие моменту времени $\boldsymbol{t} = 0{,}1$ с после предъявления фигур.

На рис. 4 приведены две карты, соответствующие моменту времени $t = 0{,}3$ с после предъявления фигур.



а ***б***

Рис. 3. Карты вызванной активности КГМ, соответствующие времени восприятия предъявленной фигуры: а – круг; б – квадрат



а ***б***

Рис. 4. Карты вызванной активности КГМ, соответствующие времени осознания предъявленной фигуры: а – круг; б – квадрат

Обращает на себя внимание то, что между правыми и левыми половинами рис. 3 наблюдается гораздо большее сходство, чем на рис. 4.

Карты, приведенные на рис. 3, соответствуют времени положительного максимума зрительного ВП (100 мс) [8] у здорового человека. Несмотря на внешние различия предъявляемых фигур, информация до зрительной зоны КГМ доходит практически одновременно. Следует отметить достаточно широкую область информационного взаимодействия в правом полушарии, что обусловлено, по всей видимости, спецификой задания.

Как видно из рис. 3, максимум когнитивного ВП (Р300) достигается к указанному в литературе времени только при опознании простой фигуры (круг). При этом область максимума отмечается не только в теменных отведениях, но в гораздо большей области правого полушария (ответственно за анализ образов). Осознание «квадрата» занимает больше времени, аналогичная картина наблюдается ко времени 0,45 с, что соответствует данным других исследователей [16].

Представляет интерес наблюдаемые в процессе развития отклика КГМ моменты активации центров формирования и распознавания речи, позволяя локализовать нейролингвистические феномены и оценить эффективность различных методик обучения.

Предлагаемый метод не только на порядки сокращает время регистрации вызванных потенциалов (единицы предъявленных стимулов вместо десятков и сотен), но и обеспечивает новое качество – возможность сравнения реакции мозга на каждый стимул.

Такой подход является принципиально новым, открывая перспективы разработки новейших систем диагностики различных нарушений, оценки степени профессиональной пригодности и построения нейроинтерфейса.

Современный уровень вычислительной техники не позволяет реализовать в полной мере математическую модель когнитивной системы, но дает инструмент ее мониторинга, измерения скорости процесса мышления, локализации и картирования.

Список литературы

1. Вернадский В.И. Размышления натуралиста. Кн. 2. Научная мысль как планетное явление. М.: Наука, 1977. 191 с.

2. Анохин П.К. Узловые вопросы теории функциональной системы. М.: Наука, 1980. 196 с.

3. Судаков К.В. Функциональные системы. М.: «Издательство РАМН», 2011. 320 с.

4. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. М.: Профессия, 2007. 752 с.

5. Гнездицкий В.В. Вызванные потенциалы мозга в клинической практике. Таганрог: Из-во ТРТУ, 1997. 252 с.

6. Рутман Э.М. Вызванные потенциалы в психологии и психофизиологии. М.: «Наука», 1979. 213 с.

7. Исайчев Е.С., Исайчев С.А., Насонов А.В., Черноризов А.М. Диагностика скрываемой информации на основе анализа когнитивных вызванных потенциалов мозга человека // Национальный психологический журнал, 2011. № 1(5). С. 70 – 77.

8. Гнездицкий В.В., Шамшинова А.М. Опыт применения вызванных потенциалов в клинической практике. М.: АОЗТ «Антидор», 2001. 480 с.

9. Патент РФ № 2502466. Способ диагностики вызванного потенциала мозга и устройство для его осуществления. от 27.12.2013 / Хадарцев А.А., Жеребцова В.А., Коржук Н.Л., Индюхин А.Ф., Индюхин А.А., 2013.

10. Liu Y., Zhang H., Chen M., Zhang L. A Boosting-Based Spatial-Spectral Model for Stroke Patients' EEG Analysis in Rehabilitation Training // IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng. 2015 Aug 20.

11. Hashemi M., Hutt A., Buhry L., Sleigh J. Optimal Model Parameter Estimation from EEG Power Spectrum Features Observed during General Anesthesia // Neuroinformatics. 2018. 16(2). P. 231-251.

12. Коржук Н.Л. [и др.]. Способ визуализации вызванной активности головного мозга // Медико-экологические информационные технологии-2017: сборник научных статей по материалам XX Международной научно-технической конференции. Юго-Зап. гос. ун-т. Курск. 2017. С. 80–88.

13. Каплан А.Я. [и др.]. Экспериментально-теоретические основания и практические реализации технологии «интерфейс мозг-компьютер» // Бюллетень сибирской медицины. 2013. Том 12. № 2. С. 21–29.

14. Cooney C., Folli R., Coyle D. Neurolinguistics Research Advancing Development of a Direct-Speech Brain-Computer Interface // Science 8, October 26. 2018. P. 105-125.

15. Черниговская Т.В. Экспериментальное исследование языка и мышления в XXI веке: традиции и возможности // Перспективные направления развития науки в Петербурге, 2015. С. 489–494.

16. Коберская Н.Н. Когнитивный потенциал Р300 // Неврологический журнал, 2003. № 6. С. 34 – 42.

Коржук Николай Львович, канд. техн. наук, профессор, nikolaikorzhuk@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Мельников Александр Христофорович, д-р медиц. наук, профессор, meln11@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Индюхин Алексей Федорович, канд. биолог. наук, доцент, ind_a_f@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DIAGNOSTIC SYSTEM OF COGNITIVE DISORDERS

N.L. Korzhuk, A.Kh. Melnikov, A.F. Indyukhin

The article discusses a method for isolating a cognitive response to an external stimulus from spontaneous bioelectrical activity of the brain, requiring an assessment of the visual image and mental verbalization. A method for visualizing evoked activity, a block diagram of a system for using band-pass filters and a mathematical model of mapping are proposed.

Key words: functional system, brain, electroencephalogram, bandpass filter, mapping.

Korzhuk Nikolai Lvovich, candidate of technical sciences, professor, nikolaikorzhuk@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Melnikov Alexander Khristoforovich, doctor of medical sciences, professor, meln11@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Indyukhin Alexey Fedorovich, candidate of biological sciences, docent, ind_a_f@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 623.4.023

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА КОРРЕКЦИЙ ТРАЕКТОРИИ УПРАВЛЯЕМОГО БОЕПРИПАСА НА ВЕРОЯТНОСТЬ ПОРАЖЕНИЯ ОДИНОЧНОЙ ЦЕЛИ

А.В. Игнатов, В.В. Русин, С.И. Стреляев,
А.Р. Санникова, С.М. Зыков, А.В. Добряков

Представлен общий вид разработанного алгоритма оценки эффективности управляемых осколочно-фугасных боеприпасов при поражении одиночной цели. Рассмотрено на конкретном примере влияние числа коррекций траектории управляемого осколочно-фугасного боеприпаса на обеспечиваемую вероятность поражения одиночной цели.

Ключевые слова: управляемый боеприпас, вероятность поражения, коррекция траектории, одиночная цель.

С увеличением дальности полёта осколочно-фугасного управляемого боеприпаса (УБ) суммарные ошибки стрельбы увеличиваются, вследствие чего существенно уменьшается вероятность поражения одиночной цели. Одним из эффективных способов уменьшения данных ошибок является реализация коррекций траектории УБ. Важной задачей при этом выступает определение оптимального числа коррекций траектории управляемого боеприпаса для обеспечения требуемой вероятности поражения одиночной цели.

Коррекция траектории УБ заключается в следующем:

с помощью дистанционно-пилотируемого летательного аппарата (ДПЛА) фиксируются координаты движущейся цели;

данные координаты передаются на пункт управления и сравниваются с прогнозируемыми;

на основании сравнения корректируются суммарные ошибки стрельбы;

скорректированные данные передаются на бортовую аппаратуру УБ (инерциально-спутниковую систему наведения).

Уменьшение суммарных ошибок стрельбы связано с тем, что при передаче новых данных на бортовую аппаратуру УБ, ошибки разведки включают в свой состав только ошибки определения координат цели, без учёта ошибок, связанных с перемещением цели до момента начала стрельбы.

Проведено исследование влияния числа коррекций траектории управляемого осколочно-фугасного боеприпаса на вероятность поражения одиночной цели с использованием соответственно разработанного алгоритма оценки эффективности (рис. 1) на конкретном примере, основные исходные данные для которого представлены в табл.

Основные исходные данные

Время подготовки стрельбы, с	60
Математическое ожидание средней скорости цели, м/с	10
Среднеквадратичное отклонение (СКО) скорости движения цели, м/с	1,1
СКО угла направления движения цели, град	2
Расход боеприпасов, шт	18
Средняя скорость полёта УБ, м/с	250
Дальность полёта УБ, км	5…70
Приведенная площадь поражаемого объекта, м^2	802

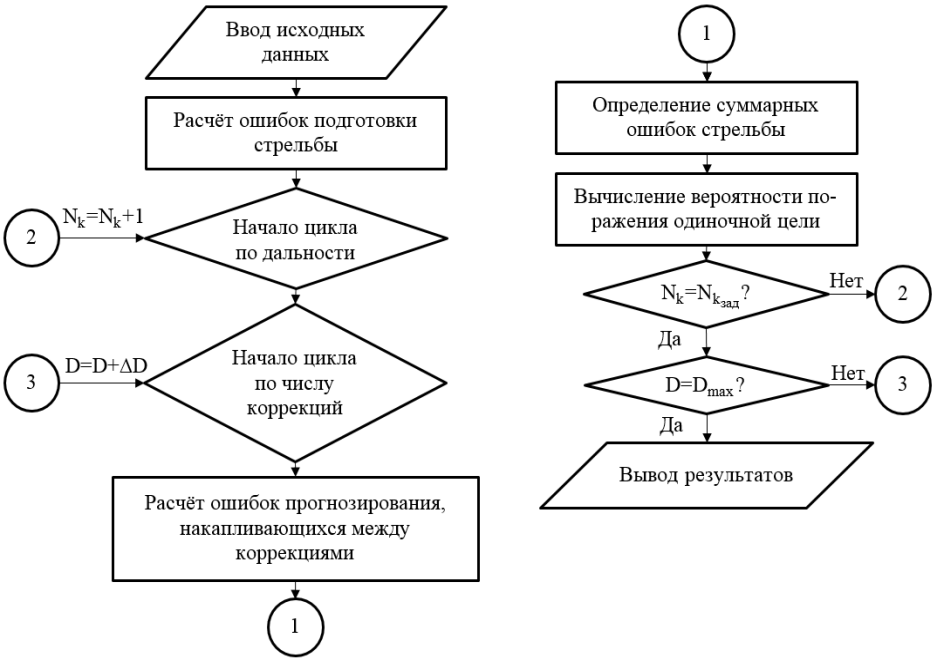


Рис. 1. Общий вид разработанного алгоритма оценки эффективности управляемых осколочно-фугасных боеприпасов:
N_k–текущее число коррекций, $N_{k\ зад}$ –заданное число коррекций, D – текущая дальность полёта, D_{max}– заданная максимальная дальность полёта, ΔD – шаг по дальности полёта

Ошибки прогнозирования перемещения цели в системе координат, продольная ось которой совпадает с направлением её движения [1]:

$$\sigma_{п} = \sqrt{\sigma_{пц}^2 + \sigma_{1пц}^2},$$

$$\sigma_{б} = \sqrt{\sigma_{бц}^2 + \sigma_{1бц}^2},$$

где $\sigma_{пц}, \sigma_{бц}$ – ошибки, связанные с погрешностью определения параметров движения цели, в продольном и боковом направлениях, м; $\sigma_{1пп}, \sigma_{1бб}$ – ошибки, связанные с прогнозируемым движением цели, в продольном и боковом направлениях, м.

Для вычисления ошибок, связанных с прогнозируемым движением цели, производят N независимых реализаций для случайных функций изменения скорости и направления движения цели в зависимости от времени [2]:

$$V_n(t_k) = \sigma_v \cdot \xi_{1n}(t_k),$$

$$\varphi_n(t_k) = \sigma_\varphi \cdot \xi_{2n}(t_k),$$

$$t_k = k \cdot \Delta t',\ t_k = 0 \ldots T,$$

где $V_n(t_k)$ – отклонение скорости движения цели за время $\Delta t'$, м/с; σ_v – среднеквадратичное отклонение (СКО) скорости движения цели, м/с; σ_φ – СКО угла направления движения цели, град; $\xi_{1n}(t_k), \xi_{2n}(t_k)$ – случайные, независимые нормальные числа; $\varphi_n(t_k)$ – отклонение направления движения цели за время $\Delta t'$, град; Т – время прогнозируемого движения цели, с; $\Delta t'$ – шаг по времени, с.

Ошибки, связанные с прогнозируемым движением цели:

$$\sigma_{1пц} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N}\left\{\sum_{k=1}^{K}\left[A \cdot \Delta t' \cdot \cos(B)\right] - V_ц \cdot T\right\}^2}{(N-1)}},$$

$$\sigma_{1бц} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N}\left\{\sum_{k=1}^{K}\left[A \cdot \Delta t' \cdot \sin(B)\right]\right\}^2}{(N-1)}},$$

$$A = \frac{(V_n(t_k) + M) + (V_n(t_{k+1}) + M)}{2},\quad B = \frac{\varphi_n(t_k) + \varphi_n(t_{k+1})}{2},$$

где M – математическое ожидание скорости движения цели, м; n – текущее число реализаций; N– количество реализаций; k– текущее количество интервалов времени; K – заданное количество интервалов времени.

После расчёта ошибок прогнозирования вычисляются суммарные ошибки стрельбы, в состав которых также входят заданные ошибки разведки.

Полученные значения суммарных ошибок стрельбы используются для оценки вероятности поражения одиночной цели управляемыми осколочно-фугасными боеприпасами.

Вероятность поражения для суммарных ошибок стрельбы, соответствующих определённой дальности полёта и числу коррекций траектории УБ, вычисляется:

$$P = 1 - \left(1 + \rho\sqrt{\frac{2}{\pi}k}\right) \cdot e^{-\rho\sqrt{\frac{2}{\pi}k}},$$

$$\rho = 0{,}477;\ \ k = \frac{N \cdot S_n \cdot \tau}{E_x \cdot E_y},$$

$$E_x = 0{,}674 \cdot \sigma_A,\quad E_y = 0{,}674 \cdot \sigma_B,$$

где N – расход снарядов, шт; S_n – приведенная площадь поражения одиночной цели, м^2; τ – табличный коэффициент, зависящий от размеров приведенной площади поражения цели и ошибок наведения [3]; σ_A – суммарная ошибка стрельбы в продольном направлении, м; σ_B – суммарная ошибка стрельбы в боковом направлении, м.

В процессе исследования влияния числа коррекций траектории УБ на вероятность поражения одиночной цели выявлены особенности изменения значений продольных σ_A и боковых σ_B суммарных ошибок стрельбы в зависимости от дальности полёта боеприпаса для разного числа коррекций траектории полёта (рис. 2, 3). Полученные графики изменения вероятности поражения одиночной цели осколочно-фугасным УБ при ранее приведённых исходных данных представлены на рис. 4.

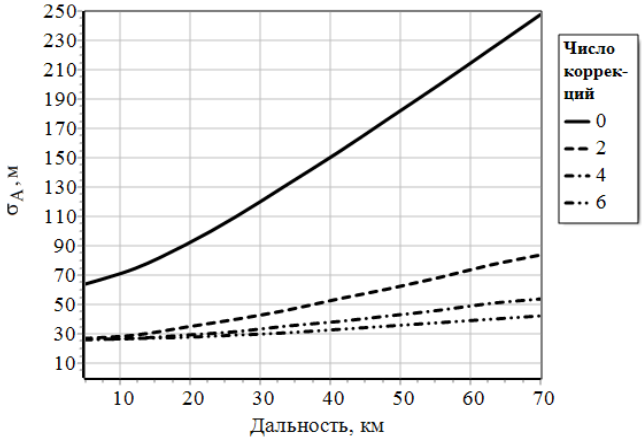


Рис. 2. Зависимости значений продольных суммарных ошибок стрельбы от дальности полёта боеприпаса для разного числа коррекций траектории полёта

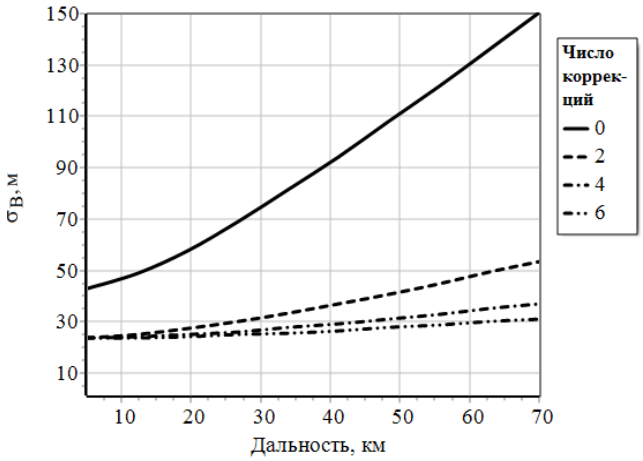


Рис. 3. Зависимости значений боковых суммарных ошибок стрельбы от дальности полёта боеприпаса для разного числа коррекций траектории полёта

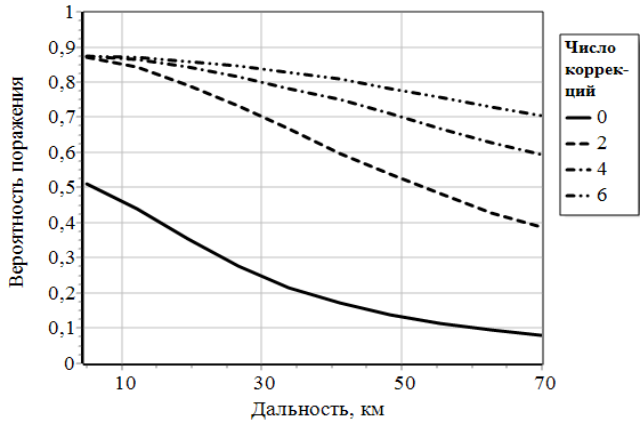


Рис. 4. Зависимости вероятности поражения заданным расходом осколочно-фугасных УБ одиночной цели от дальности полёта боеприпаса для разного числа коррекций траектории полёта

Как следует из рис. 2 и 3, суммарные ошибки стрельбы, как в продольном, так и боковом направлениях, без коррекции траектории полёта УБ для всех рассмотренных дальностей полёта, значительно выше аналогичных ошибок для случаев с коррекцией траектории полёта боеприпасов (в 2…2,5раза). Обеспечиваемые вероят-

ности поражения (рис. 4) при этом существенно меньше при отсутствии коррекций траектории полёта УБ (в 1,8…3раза). Увеличение числа коррекций (>(1…2)) на малых дальностях полёта боеприпасов (до 15 км) незначительно сказывается на уменьшении суммарных ошибок стрельбы, и соответственно, на повышении вероятности поражения. Начиная со 2 коррекции, вклад каждой коррекции в повышение вероятности поражения цели меньше вклада предыдущей коррекции (в 1,2…1,5 раза).

Полученные результаты и сделанные выводы в дальнейшем могут быть использованы при определении оптимального числа коррекций траектории осколочно-фугасных УБ для обеспечения требуемой вероятности поражения одиночной цели.

Список литературы

1. Алябьев С.А., Игнатов А.В., Русин В.В. Эффективность комплексов управляемого ракетно-артиллерийского вооружения /под ред. А.Г. Шипунова. Тула: Издательство ТулГУ, 2011. 151 с.

2. Бобриков А.А., Авотынь Б.А, Анисимов Е.Г. и др. Оценка эффективности огневого поражения ударами ракет и огнём артиллерии. СПб: «Галеяпринт», 2006. 424 с.

3. Фендриков Н.М., Яковлев В.И. Методы расчётов боевой эффективности вооружения. М.: Воениздат, 1971. 224 с.

Игнатов Александр Васильевич, д-р техн. наук, директор по научной работе, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»,

Русин Владимир Владимирович, канд. техн. наук, заместитель начальника отдела, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»,

Стреляев Сергей Иванович, д-р техн. наук, профессор, sergeystrel@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Санникова Анастасия Романовна, инженер, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»,

Зыков Станислав Михайлович, ведущий инженер-исследователь, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»,

Добряков Алексей Викторович, канд. техн. наук, начальник сектора, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»

EFFECT OF NUMBER OF GUIDED PROJECTILE PATH CORRECTIONS ON SINGLE TARGET KILL PROBABILITY

A.V. Ignatov, V.V. Rusin, S.I. Streliaev, A.R. Sannikova, S.M. Zykov, A.V. Dobriakov

General view of algorithm estimation of efficacy guided high-explosive fragmentation projectiles is presented. Concrete example of effect of number of guided high-explosive frag-mentation projectile path corrections on single target kill probability is considered.

Key words: guided projectile, target kill probability, path correction, single target.

Ignatov Aleksandr Vasilevich, doctor of technical science, director of science work, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP named after Academician A. Shipunov»,

Rusin Vladimir Vladimirovich, nominee of technical science, deputy chief of department, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP named after Academician A. Shipunov»,

Streliaev Sergey Ivanovich, doctor of technical science, professor, sergey-strel@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Sannikova Anastasia Romanovna, engineer, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP named after Academician A. Shipunov»,

Zykov Stanislav Michailovich, leading engineer, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP named after Academician A. Shipunov»,

Dobriakov Aleksei Viktorovich, nominee of technical science, chief of sector, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP named after Academician A. Shipunov»

УДК 623.5

УВЕЛИЧЕНИЕ РАЗРУШАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ МАЛОКАЛИБЕРНЫХ БОЕПРИПАСОВ ПО ЛЕГКОБРОНИРОВАННЫМ ЦЕЛЯМ

Т.Е. Заводова, Е.А. Хмельников, К.В. Смагин

В статье рассматривается возможность усиления разрушающего действия малокалиберных артиллерийских боеприпасов в топливных баках самолетов и вертолетов. Предложена методика расчета зажигательного действия малокалиберной артиллерии. Повышение разрушающего действия подобного типа боеприпасов достигнуто путем замены стандартного стального корпуса боеприпаса на корпус из полимерных материалов. Проведено сравнение результатов расчета вероятности зажигательного воздействия ударников на основе фторполимеров на дизельное топливо. Расчеты проводились с использованием методов «Осколковый критерий» и «Энергетический баланс».

Ключевые слова: малокалиберная артиллерия, зажигательный эффект, осколковый критерий, энергетический баланс.

В современном бою ствольная артиллерия малого калибра имеет высокую эффективность в борьбе как с слабозащищенной, так и с легкобронированной техникой. В эти группы техники входит как наземная техника (боевая машина пехоты (БМП), бронетранспортер (БТР) и их разновидности), так и различные виды летательных аппаратов. В связи с активным применением в последнее время штурмовой и тактической авиации и вертолетов против техники противника, развитие и совершенствование боеприпасов (БП) ствольной артиллерии малого калибра приобрело особую необходимость. Эффективность воздействия на авиацию БП малого калибра складывается из суммарного количества попаданий, приведших, в конечном итоге, к нарушению систем жизнеобеспечения и функционирования авиатехники.

В результате исследований поражаемости боевых самолетов различных типов были выявлены 6 основных причин, которые приводили к невозвращению самолетов на свои базы в результате противодействия противника: пожар или взрыв летательного аппарата, повреждение его силовой установки, потеря управляемости, взрыв боеприпасов на борту, повреждение конструкции планера.

Наиболее перспективными, с точки зрения противодействия легкобронированной авиации, являются поражения конструкции планера и пробитие баков и зажжение топлива в них.

В современных самолетах общая площадь, занимаемая топливными баками, составляет 30…60 % от всей площади самолета, являющегося уязвимой целью. Для жизнеобеспечения авиатехники в основном используются несущие топливные баки (баки кессонного типа). Кром этого, используются подвесные топливные баки, в зависимости от назначения самолета. Несущий топливный бак представляет собой загерметизированный объем основных конструкций самолета (фюзеляж, крылья) и вместе с функцией емкости выполняет также силовые функции.

Поражение функционирования важных агрегатов самолетов и вертолетов при действии ударников, пуль и осколков может происходить за счет следующих факторов:

1. Ударное (пробивное) действие на экипаж и приборы управления, силовую установку и топливные баки (потеря топлива через пробоины). Механическое воздействие на топливные баки малоэффективно, поскольку защитный слой при повреждении приводит к самозатягиванию пробоины.

2. Зажигательное действие на гидросистему силовой установки, масляные и топливные баки.

3. Инициирующее действие ударником на боекомплект и бомбовую нагрузку.

4. Гидроудар в топливных баках (детонация, взрыв и пожар).

Из приведенных выше физических факторов поражения важных функциональных узлов самолетов и вертолетов, наибольший интерес представляет зажигательное действие.

Основной причиной воспламенения горючего в топливных баках является то, что обшивка корпуса самолетов изготавливается из сплавов, содержащих алюминий, титан и ряд других достаточно легко воспламеняющихся материалов. При пробитии обшивки, выполняющей роль своеобразного экрана, образуется факел раскаленного диспергированного металла. При ударе пулей или осколком в топливный бак, в пространстве между обшивкой и поврежденной стенкой бака происходит контакт факела частиц и топливной смеси, что приводит к воспламенению топлива с определенной вероятностью, зависящей от атмосферного давления, температуры окружающей среды, давления паров горючего, концентрации смеси и кислорода в смеси и окружающем воздухе. Однако, поражение такого типа происходит только при отсутствии внутренней комплексной защиты, имеющей многослойную структуру, включающую в себя пенопласт и латексную губчатую резину.

Среди различных методов защиты самолетов от действия поражающих элементов основными являются бронирование кабины экипажа и, в некоторых случаях, элементов силовой установки. Из-за ограничения по весу и плотности компоновки летательных аппаратов в качестве брони чаще всего используют композитные материалы, обеспечивающие сочетание таких свойств, как высокий предел прочности и достаточная вязкость разрушения, а также повышенная удельный модуль упругости по сравнению с традиционными сплавами.

Среди распространенных композитных материалов следует отметить следующие: боралюминиевые, углеалюминиевые, титановые с армированием борсиком и никель-хромовые с армированием кремнием.

Следовательно, актуальной становится задача по созданию нового типа малокалиберных боеприпасов, обладающих не только необходимой удельной энергией для пробития преграды, но и последующим зажигательным запреградным действием, способным привести к поражению авиационной цели. Одним из возможных направлений увеличения запреградного зажигательного действия является применение в конструкциях боеприпасов и поражающих элементов реакционных материалов, содержащих в своем составе фторопласт.

В случае изучения взаимодействия фторполимерных поражающих элементов и легкобронированных авиационных целей, разумно использовать синтетический подход, который позволит оценить не только глубину и диаметр каверн на закрылках самолета и лопастях вертолета, но и оценить физически сложные процессы пробития топливных баков с последующим зажжением топливной смеси.

Экспериментально было доказано, что фторполимеры имеют меньшую удельную кинетическую энергию, затрачиваемую на разрушение преграды (рис. 1) по сравнению с недеформируемыми сталями и текстолитовыми ударниками.

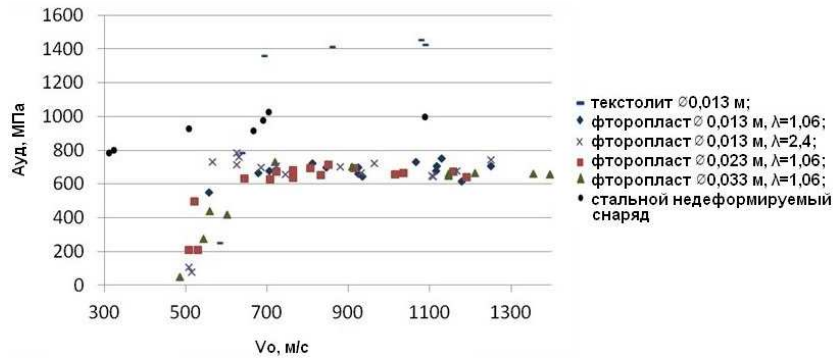


Рис. 1. Изменение удельной работы вытеснения единицы объема (Ауд) материала преграды из АМц от скорости соударения

Поэтому, в качестве материала для создания БП, способных вызвать зажигательное запреградное действие, был выбран фторопласт. Политетрафторэтилен (ПТФЭ, фторопласт Ф-4, Ф-4Д или тефлон), обладает рядом уникальных физико-химических, антифрикционных и антиадгезионных свойств [1 – 3]. Он инертен к агрессивным средам (вплоть до окислительных), не токсичен в обычных условиях, является диэлектриком, термостоек и взрывобезопасен.

Вопрос об ударопрочности фторполимеров трудно обсуждать уже потому, что сами критерии ударопрочности для полимерных материалов определены нечетко. По данным соответствующих испытаний, фторполимеры неизменно оказываются среди наиболее ударопрочных полукристаллических полимеров, которые имеют заметную пластичность при низких температурах. В то же время существующие методы испытания на ударопрочность не позволяют связать ее со структурой и морфологией и предсказать характер ее изменения с температурой и (или) со скоростью нагружения. Иллюстрацией этого может служить упомянутое выше исследование удара пулей при скоростях полета 58 м/с, хотя по жесткости и пластичности ПТФЭ не уступает ни одному другому полимеру.

ПТФЭ один из наиболее стабильных полимеров, но термодинамически неустойчив. Известно [2 – 4], что при высоких температурах происходит термоокислительная деструкция фторопласта (которую можно предотвращать введением специальных стабилизаторов) с образованием фтористого водорода, перфторизобутилена, оксида углерода, аэрозоли фторопласта. Распад до графита и тетрафторметана протекает с выделением теплоты (113 кДж). Под высоким давлением происходит разложение ПТФЭ до углерода и, вероятно, фторуглеродных газообразных продуктов. Температура разложения составляет 700 °С при 200 МПа и возрастает да 800 °С при 300 МПа. Разложение протекает быстро при достижении критических условий. Разложение перфторциклобутана и других фторуглеродов под высоким давлением иногда происходит со взрывом и сопровождается образованием черных карбонизированных продуктов [2].

Основным продуктом пиролиза ПТФЭ в диапазоне температур до 600 °С является молекула тяжелого газа - мономер тетрафторэтилена (ТФЭ), содержащий примеси. Реакция разложения ТФЭ до конечных продуктов (сажи и тетрафторметана) протекает с выделением большого количества теплоты (226,3 кДж/моль). Известно, что ТФЭ не способен взрываться при атмосферном давлении, но при повышенных давлении и температуре (возникающих, в частности, при неизотермической полимеризации) ТФЭ может разлагаться со взрывом. Согласно [3], при взрыве газообразного ТФЭ, находящегося при начальном давлении 10 ... 15 атм. и комнатной

температуре, давление продуктов разложения в замкнутом объеме может возрасти в 8...10 раз. При начальной температуре 80°С ТФЭ становится взрывоопасным при достижении давления 6 атм. (0,6 МПа). Экспериментально установлено, что дефлаграционное горение ТФЭ может переходить и в режим детонации. Замечено также, что вероятность взрыва (взрывного горения) и перехода горения в детонацию резко возрастает при попадании в ТФЭ воздуха.

При проведении лабораторных исследований процесса высокоскоростного взаимодействия с алюминийсодержащими преградами ударников, выполненных из различных материалов, выявлен эффект высокой разрушающей способности ударников из ПТФЭ относительно других полимерных материалов и стальных ударников [7, 8]. Эксперименты проводились на баллистической установке, позволяющей метать ударники калибром 13, 23, 33 мм, длиной от 1 до 12 калибров со скоростями 300 ... 1500 м/с. В качестве преград использовались листы и плиты из алюминиевых сплавов: АМц, АМг5, АМг6, Д16, многослойные пакеты из названных материалов; элементы планера самолета и лопасти вертолета, а также материалы: сталь, дерево, текстолит.

При проведении стрельбовых испытаний по преграде из АМц ударниками из полиэтилена, эбонита, текстолита и фторопласта (при фиксированной начальной кинетической энергии ударников) в работе [7] были получены каверны, заметно отличающиеся по своим параметрам. Наибольшие параметры каверн по диаметру, глубине и объему соответствовали ударникам из фторопласта. Кроме этого экспериментальные исследования показали, что при скоростях соударения ударников из ПТФЭ порядка 600 м/с и выше на поверхности каверны и вокруг нее в радиусе до 6...8 калибров ударника образовывался черный налет карбонизированных продуктов. С целью определения их химического состава, собранные из каверны с помощью препаровальной иглы частицы черного цвета подвергались рентгенофазному анализу, который показал, что исследуемые частицы состоят из металлического алюминия и фторида алюминия AlF_3. Черный цвет этих частиц вызван наличием на них сажи.

На основании этого был сделан вывод: ударник из ПТФЭ при скоростях соударения более 600 м/с действует на алюминийсодержащую преграду как активный элемент: вступает в окислительную химическую реакцию с материалом преграды и, учитывая экзотермичность процесса разложения ПТФЭ до конечных продуктов (около 100 кДж/моль) и еще более высокую экзотермичность образования AlF_3 (1 510 кДж/моль), вызывает существенное дополнительное энерговыделение в процессе взаимодействия [7, 8].

Для сравнения результатов взаимодействия инертных ударников и ударников из фторопласта был проведены эксперименты по взаимодействию ударников массой 8,6 г по алюминийсодержащей преграде из сплава АМц при одинаковых условиях метания. Ударники взаимодействовали с преградой под углом 90°. В качестве инертного материала был использован текстолит. Анализ экспериментальных данных показал, что значения параметров каверн для текстолита и фторопласта одинаковы или очень близки до скоростей соударения порядка 600 м/с. При дальнейшем увеличении скорости соударения параметры каверн от действия фторопластового ударника возрастают значительно интенсивней, чем от действия текстолитового ударника.

Рентгенофазовый анализ химического состава продуктов взаимодействия ударника из фторопласта и преграды из АМц показал, что исследованные частицы представляют собой смесь металлического алюминия, сажи и фторида алюминия AlF_3. Это позволяет предположить, что при ударном взаимодействии фторопластового ударника с алюминийсодержащей преградой между материалом ударника и материалом преграды возможно протекание экзотермической химической реакции.

Для подтверждения гипотезы о прохождении термохимической реакции между фторопластом и другими легкими сплавами, были проведены эксперименты по взаимодействию фторопластовых ударников с преградами из сплавов титана - ВТ1-0 и ВТ-20. Анализ результатов экспериментов показывает, что при соударении ударников,

содержащих фторопласт, с преградами на основе титановых сплавов, на поверхности образуется характерный черный налет продуктов взаимодействия, аналогичный образующемуся при взаимодействии с алюминий содержащей преградой. Это позволяет очередной раз предположить протекание химической реакции между фторопластом и титаном преграды.

Рентгенофазовый анализ химического состава продуктов взаимодействия фторопласта и преграды из титанового сплава показал, что наслоения, выявленные в области каверны и не имеющие диффузионного слоя с основой материала образца, состоят из титана и фтора. На наслоениях были обнаружены частицы, имеющие шарообразную форму разного размера (1…15 мкм), которые содержат железо, титан, кислород, фтор, а в качестве примесей – алюминий, серу, хлор. Соединений фтора с титаном TiF_2, TiF_3, TiF_4 обнаружено не было. Этот факт объясняется тем, что фториды титана в отличие от фторидов алюминия [9] являются летучими соединениями. Проведение экспериментов в замкнутом объеме позволило зафиксировать не только факт увеличения каверны и наличие сажи на ее поверхности, но и наличие фторидов титана. Оценить величину тепловыделения в процессе взаимодействия ударника с преградой можно по цветам побежалости лицевых слоев в зоне контакта - температура нагрева их составляла порядка 500 ºС.

На следующем этапе обработки данных экспериментов исследовалось распределение твердости титановых плит в районе каверны после их ударного нагружения. Была произведена резка темплетов и произведен замер твердости по методу Виккерса. Значения твердости (рис. 2) определяли на приборе ZWICK–3212 при нагрузке 5 кг.

Также исследовалось изменение в микроструктуре титанового сплава после динамического нагружения. Исследование микроструктуры проводили на оптическом микроскопе NEOPHOT–21 в отраженном свете при увеличениях: х200 и х1000.

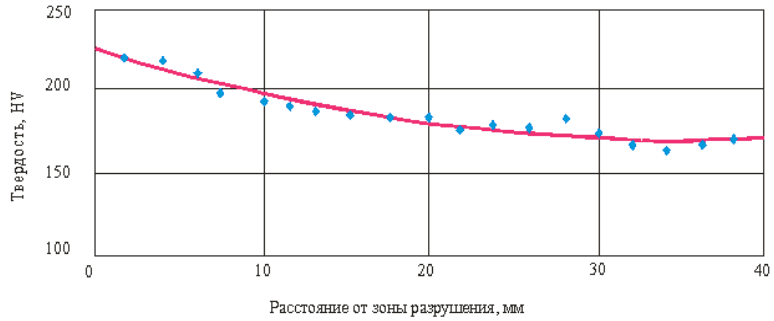


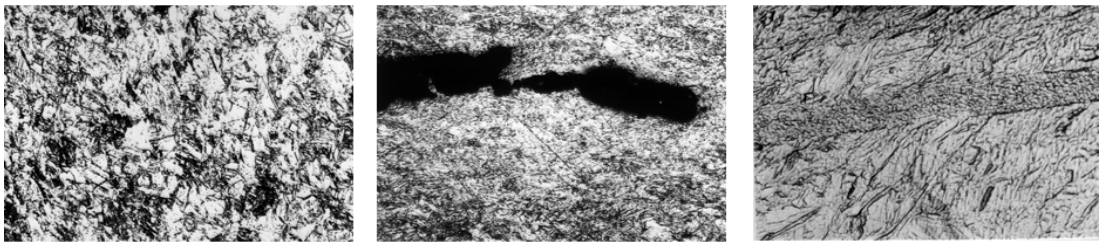
Рис. 2. Изменение микротвердости в районе каверны

Микроструктура исследованных образцов в участках, находящихся на удалении порядка 40 мм от зоны разрушения представлена на рис. 3. Видно, что она состоит из деформированных сильно двойникованных зерен (такая структура характерна для горячекатанных плит сплава ВТ1-0). В зоне, находящейся вблизи зоны разрушения, зерна деформированы (рис. 3, б) и имеют волокнистый вид. Наибольший интерес представляют трещины. Начинаясь на поверхности, трещины идут вглубь металла и обрываются, не сужаясь при этом. От вершин трещин далее идут узкие полосы с рекристаллизованной мелкозернистой структурой (рис. 3, в). Аналогичная структура также окружает и трещину.

Рентгеноструктурное исследование, проведенное на установке УРС2.0 в медном излучении при напряжении 30 В и токе 15 мА, показало, что в образце произошли начальные процессы полигонизации. Это видно на некоторых дебаеграммах по размытым линиям с небольшой рябью (рис. 4).

Известно, что при разложении смесей фторопласта с различными металлами (*W, Zr, Ti, Al*) [10, 11, 12] смесь на основе порошка фторопласта и титана является наиболее активной. Для данной смеси экзотермическая реакция разложения с образо-

ванием газообразных продуктов реакции протекает при более низкой температуре по сравнению с другими рассмотренными смесями. Реакция разложения состава протекает в узком температурном интервале ($\Delta T \approx 20$ K) и носит взрывной характер. Максимальная скорость реакции реализуется при температуре $T_m = 537\ ^0$C. Как указывалось ранее, изучение цветов побежалости позволило оценить значение температуры ~500 ^{0}C, которое близко к значению температуры T_m. Оценка теплового эффекта взаимодействия фторопласта с алюминием [7, 10, 13], и фторопласта с титаном [10] показывает, что дополнительная энергия, выделяемая в результате экзотермической химической реакции, больше у алюминия, чем у титана, но из-за быстроты протекания процесса высокоскоростного соударения она выделяется не полностью, что доказано экспериментально.



а ***б*** ***в***

Рис. 3. Микроструктура исследованных темплетов:
а – исходное состояние х200; б – трещина х200; в – полоса х1000

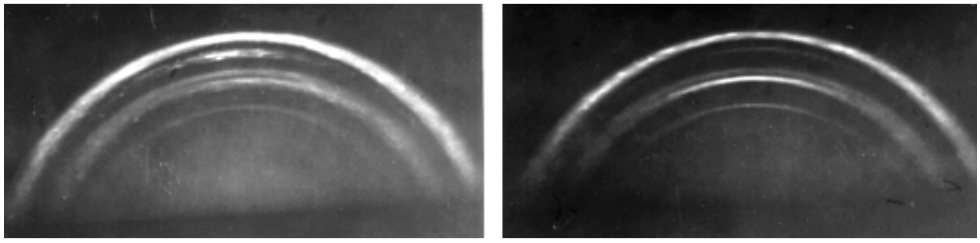


Рис. 4. Рентгенограммы рекристаллизации

Проведенные исследования при различных экспериментальных условиях, показывают высокое выделение теплоты, что вызвало необходимость провести проверку предположения о высокой зажигательной способности ударников на основе фторопласта.

Если говорить о физическом смысле данного процесса, то необходимо отметить, что такое возможно за счет прохождения термоокислительной деструктивной реакции фторполимеров при высокоскоростном взаимодействии с легкими сплавами на основе титана и алюминия [14] (рис. 5). Давление, возникающее на границе контакта преграды и поражающего элемента, превышает минимальное давление, необходимое для прохождения экзотермичной реакции взрывоподобного типа, сопровождающейся выделением фторида алюминия или титана [15] (рис. 6). В процессе удара такие поражающие элементы деформируются и разрушаются, что вместе с взрывоподобной реакцией приводит к увеличению пробоин и многофакторному (термобарическому и фугасно-зажигательному) действию в запреградном пространстве. При выходе диспергированного облака, состоящего из частиц фторопласта и титана или алюминия, на тыльную сторону происходит его мгновенное расширение, что способствует увеличению диаметра каверны, края которой загибаются на внешнюю сторону, образуя в случае тонких слоистых преград звездчатую форму. Высокая температура и образующиеся мелкодисперсные конденсированные продукты нарушают работу электронных устройств приборных отсеков цели.

Рассматривая процесс проникания любого срабатывающегося (теряющего массу в процессе проникания или деформирующегося) ударника в преграду можно отметить, что слои материала преграды и деформирующегося ударника движутся парал-

лельно, при этом происходит взрывоподобная реакция, основанная на термокислительных процессах, проходящих между ударником и материалом преграды. Процессы параллельного окисления были рассмотрены на различные рода газовых смесях и сформированы в методе Counterflow Diffusion Flame (CDF), впервые предложенном Цудзи и Ямаока [16].

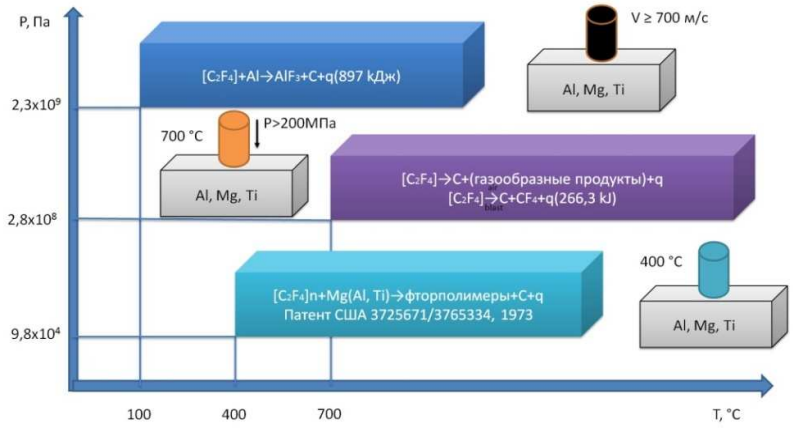


Рис. 5. Варианты взаимодействия фторполимеров с легкими сплавами

Результаты, полученные в ходе экспериментов [17], подтверждают математическую модель взаимодействия фторопластовых ударников и преград на основе легких сплавов, предложенную авторами, что позволяет перейти к рассмотрению конкретных практических задач.

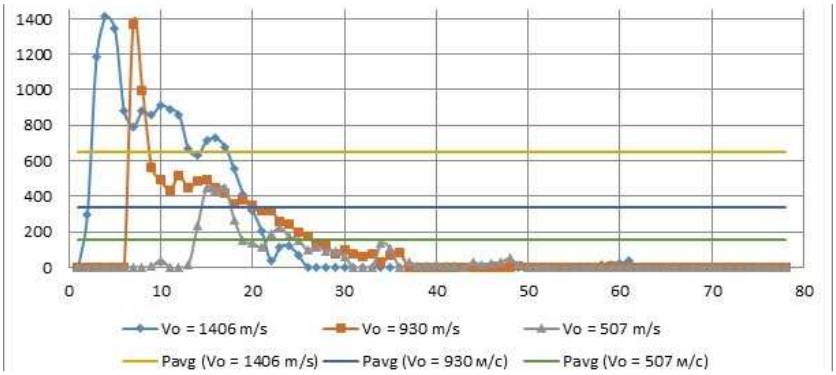


Рис. 6. Средние давления, возникающие на границе контакта фторопластового ударника и преграды на основе алюминия

Определение зажигательного действия фторопластовых боеприпасов по топливной и маслопроводной системе было проведено на установке «Баллистический стенд». Схема проведения эксперимента представлена на рис. 7.

В качестве материала корпуса топливного бака была выбрана не реагирующая с фторполимерами сталь с прослойкой из губчатой латексной резины, что позволит оценить чистое зажигательное действие, возникающее непосредственно от проникающего ударника, без влияния алюминиевой или алюминий-титановой обшивки воздушной цели. В качестве топлива было взято зимнее дизельное топливо, обладающее пониженными характеристиками воспламеняемости и характеристиками вязкости. Для оценки влияния факторов (форма головной части, возможные комбинации фторопласта и алюминия) влияющих на зажигательное действие эксперименты проводились с ударниками различных конфигураций.

Конструкции ударников, используемых для проведения экспериментов представлены на рис. 8.

Ряд результатов экспериментов по определению зажигательного запреградного действия приведены в табл.

Анализ результатов стрельб показывает, что воспламенение топлива произошло при испытании комбинированных ударников из АМц и фторопласта и отдельных ударников из чистого фторопласта.

Одним из наиболее распространённых путей оценки зажигательного действия осколков, поражающих элементов и пуль, является метод оценки по «Осколковому критерию» [18].

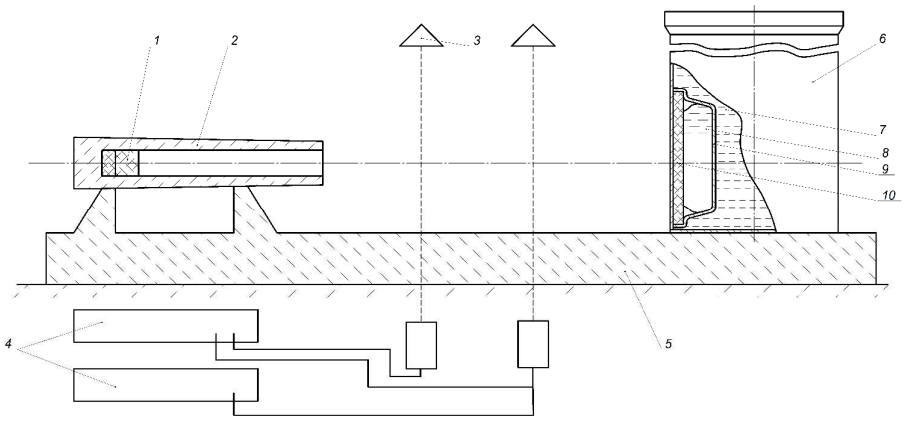


Рис. 7. Схема установки «Баллистический стенд»
1 - ударник из фторполимерного материала; 2 - артиллерийская установка; 3 - фотоблокировка; 4 - баллистический хронограф; 5 - основание; 6 - корпус бака; 7 - уловитель (вода); 8 - горючее; 9 - упор; 10 - губчатая латексная резина

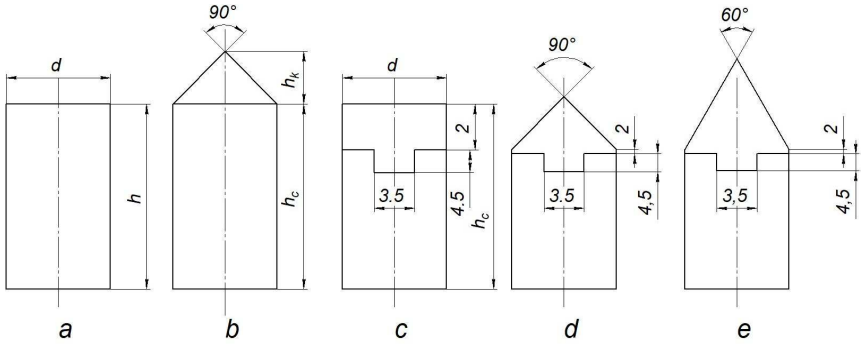


Рис. 8. Схемы конструкций ударников
a – ударник цилиндрической формы (фторопласт, сталь); b – ударник с конусной частью и углом при вершине 90 ^{o} (фторопласт, сталь); c – ударник из Al и Ft с углом при вершине 180 ^{o}; d – ударник из Al и Ft с углом при вершине 90 ^{o}; e – ударник из Al и Ft с углом при вершине 60 ^{o}

При оценке возможности зажжения топлива в этом методе ударный импульс высчитывается по следующему выражению (1)

$$i = 0.000204 \cdot m^{1/3} \cdot V \quad (1)$$

где m – масса осколка, г; V – скорость осколка, м/с.

При удельном импульсе $i \leq 0{,}16$ вероятность воспламенения равна нулю. При удельном импульсе $i \geq 2{,}5$ вероятность зажжения топлива близка к единице. Анализируя исходные данные для удельного импульса заложенные в методе «Осколкового критерия», была получена аппроксимационная зависимость для определения вероятности зажжения топлива (2):

$$p = 1 + 1.08 \cdot e^{-4.16i} - 1.96 \cdot e^{-1.46i} \quad (2)$$

Результаты экспериментов по зажжению топлива за комбинированной преградой

№	Материал ударника/угол при вершине, α˚	m, г	Скорость, V, м/с	Результат: + зажжение; – нет
1	Ф / 180˚	9	916,34	–
2	Сталь 60 / 180˚	9	1025,69	–
3	Б-32	48	828,64	–
4	Ф / 90˚	9	898,11	–
5	Сталь 60 / 90˚	9	864,54	–
6	Ф / 180˚	9	989,17	–
7	Ф / 90˚	9	1128,53	+ устойчивое
8	Ф / 90˚	9	918,51	–
9	Ф + АМц / 180˚	9	1106,64	+ устойчивое
10	Ф + АМц / 90˚	9	986,15	+ устойчивое
11	Ф + АМц / 90˚	9	1092,88	+ устойчивое
12	Ф + АМц / 180˚	9	863,12	–
13	АМц + Ф /60˚	9	1153,91	+ устойчивое
14	АМц + Ф /180˚	9	1006,32	+ устойчивое
15	Ф / 90˚	9	916,58	–
16	Ф / 180˚	9	1013,18	–

На рис. 9 показана зависимость вероятности воспламенения топлива от кинетической энергии ($E_к$). Однако, при использовании осколкового критерия все зависимости строились на основании вычисленного удельного импульса, который зависит от массы ударника и начальной скорости взаимодействия, никак не учитывая дополнительную энергию, выделяющуюся при протекающей химической реакции, между фторопластом и алюминием, которая в свою очередь, существенно влияет на воспламенение дизельного топлива.

Для оценки влияния химической реакции на воспламенение дизельного топлива в топливных баках был проведен анализ, позволяющий оценить количество энергии, выделяющейся в процессе химической реакции, затрачиваемой на нагрев дизельного топлива до температуры самовоспламенения.

В качестве ударников для математического расчета по уравнениям энергобаланса были приняты 3 вида упрощенных моделей: сборка № 1 (рис. 10, a), сборка № 2 (рис. 10, b). Общая масса ударника составляла 9 гр, в соответствии с условиями эксперимента. Для оценки влияния химической реакции массы фторопласта и алюминия в сборках варьировались от 1 до 8 гр.

Энергия, затрачиваемая на нагрев дизельного топлива во время движения ударника внутри топливного бака, будет складываться из 3-х составляющих:

$$E_{st} = E_{react} + E_{def} + E_{dec}\text{, кДж} \quad (3)$$

где E_{react} – энергия, выделившаяся в результате химической реакции, кДж; E_{def} – энергия, выделившаяся в результате деформирования ударника, кДж; E_{dec} - энергия, выделившаяся в результате торможения ударника в топливе, кДж.

Энергия деформирования ударника определяется в зависимости от относительной деформации головной части ударника ε и динамического предела текучести материала σ_{df}^*:

$$E_{def} = 0.95 \cdot \frac{S_{mid} \cdot \sigma_{df}^* \cdot \varepsilon}{T^*}\text{, кДж} \quad (4)$$

где S_{mid} – площадь миделева сечения ударника, м^2; T^* - коэффициент перевода механической энергии в тепловую, кДж.

Проведенный анализ для различных конфигураций сборок ударников показывает, что влияние энергии деформирования на общую энергию ударника составляет менее 1%, и в дальнейших расчетах не учитывается. Вероятно, такой низкий показатель связан с малым временем процесса движения ударника в топливе (порядка 10-15 μs), которого явно недостаточно для процесса теплопередачи от ударника к топливу.

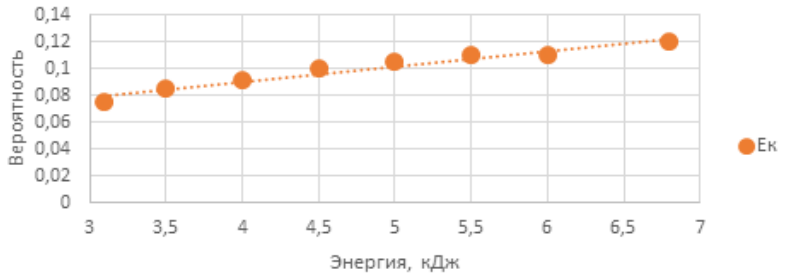


Рис. 9. Зависимость вероятности воспламенения от энергии

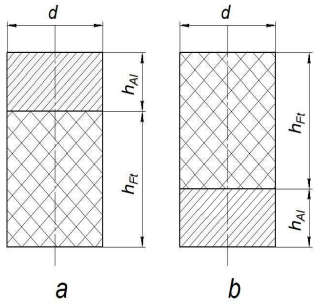


Рис. 10. Схемы конструкций ударников для математического расчета

Энергия торможения ударника может быть вычислена исходя из уравнений движения ударника в жидкости. В момент проникания ударника вовнутрь топливного бака во всем объеме жидкости возникнет некоторое поле скоростей, а начальная скорость движения ударника v_{fmax} будет меньше скорости соударения ударника с жидкостью v_c. Величину v_c определяют по методу Н.Е. Жуковского. Закон сохранения количества движения для момента соударения можно записать в виде:

$$(m+m_0)\frac{dv_f}{dt} = mg - \rho_{DF} gV - c_x \frac{\rho_{DF} v_f}{2} S_{mid}, \quad (5)$$

где m_0 - присоединенная масса, кг; v_f – скорость движения ударника внутри бака в каждый момент времени, м/с; c_x – коэффициент лобового сопротивления ударника, кгм/с^2; ρ_{DF} – плотность дизельного топлива, кг/м^3; V - объем ударника, м^3; g – коэффициент силы тяжести, м/с^2.

Начальная v_{fmax} и предельная v_{lim} скорости движения ударника в жидкости определятся как:

$$v_{f\max} = \frac{v_c}{1+\frac{m_0}{m}}, \; v_{\lim} = \sqrt{\frac{2(mg-\rho gV)}{c_x \cdot \rho \cdot S_{mid}}}, \text{ м/с} \quad (6)$$

Начальная скорость соударения ударника с жидкостью определиться исходя из баланса кинетической энергии ударника:

$$v_c = \sqrt{\frac{2E_{res}}{m}}, \text{ м/с} \quad (7)$$

где E_{res} – остаточная энергия ударника, вычисленная как разница между начальной энергией ударника и энергией, затраченной на разрушение преграды при удельной энергии разрушения преграды равной $E_{yд}$ = 766,67 Дж/см^2 [18].

Величину присоединенной массы можно определить через коэффициент присоединенной массы, который является функцией удлинения ударника и его объем.

$$m_0 = \mu_0 \cdot \rho_{DF} \cdot V, \quad (8)$$

где μ_0 - коэффициент присоединенной массы.

Коэффициент присоединенной массы был определен методом аппроксимации табличных данных для жидкости с плотностью 800…1000 кг/м^3 [19]:

$$\mu_0 = 0.5187 \cdot \lambda^{-1.342}, \quad (9)$$

где λ - величина относительного удлинения ударника.

Графики распределения присоединенной массы для сборок № 1 и № 2 в зависимости от массы фторопласта представлены на рис. 11.

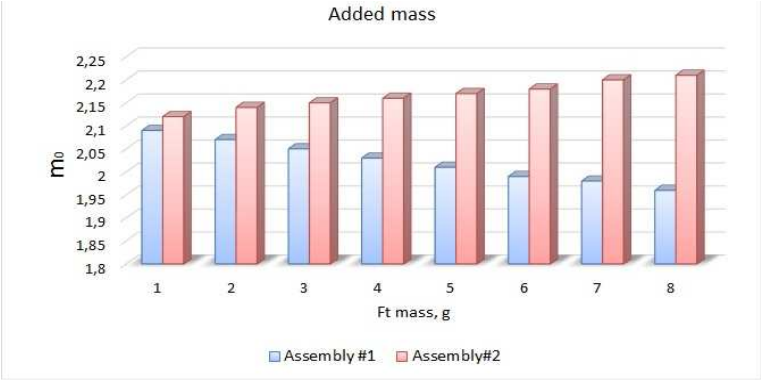


Рис. 11. Распределение присоединенной массы дизельного топлива

Для определения количества энергии, выделившейся в результате химической реакции были использованы методы термохимии [4 – 7]

$$1{,}5\ [C_2F_4] + 2\ Al = 2\ AlF_3 + 3C + q, \quad (10)$$

Откуда:

$$q = 1{,}5\ \Delta H_f([C_2F_4]) + 2\ \Delta H_f(Al) - 2\ \Delta H_f(AlF_3) - 3\ \Delta H_f(C), \quad (11)$$

где ΔH_f – молярная энтальпия ($\Delta H_f(Al) = \Delta H_f(C) = 0$; $\Delta H_f(AlF_3) = -1490$ кДж/моль; $\Delta H_f([C_2F_4])$ – неизвестная величина).

Воспользуемся известной реакцией:

$$[C_2F_4] = CF_4 + C\ (\text{графит}) + 113\ \text{кДж/моль}. \quad (12)$$

Отсюда:

$$\Delta H_f([C_2F_4]) = 113 + \Delta H_f(C) + \Delta H_f(CF_4). \quad (13)$$

Поскольку $\Delta H_f(C) = 0$, $\Delta H_f(CF_4) = -907$ кДж/моль, то $\Delta H_f([C_2F_4]) = 113 - (-907) = -794$ [кДж/моль].

Отсюда:

$$q = 1{,}5\ (-794) + 2 \times 1490 = 1789\ [\text{кДж/2моля } AlF_3]. \quad (14)$$

Таким образом, при взаимодействии фторопласта с алюминием выделяется теплота q = 895 кДж/моль.

Молярная масса алюминия в реакции $M(Al) = M_r(Al) \cdot 2 = 53{,}96$ г/моль, молярная масса фторопласта в реакции $M(Ft) = M_r(Ft) \cdot 1.5 = 798.525$ г/моль, где $M_r(Al)$ и $M_r(Ft)$ - молекулярная масса алюминия и фторопласта, соответственно.

Далее находим количество молей вещества, способных после внедрения в стенку бака вступить в химическую реакцию. Количество молей алюминия и молей фторопласта, способных вступить в реакцию определиться как отношение массы алюминия и фторопласта к молярным массам алюминия и фторопласта:

$$N_{Al} = \frac{m_{Al}}{M(Al)}; N_{Ft} = \frac{m_{Ft}}{M(Ft)}, \text{ моль} \quad (15)$$

Для определения энергии, выделившейся в процессе прохождения химической реакции выбираем наименьшее количество молей веществ (фторопласта или алюминия), способных вступить в реакцию и домножаем это значение на количество теплоты реакции, вычисленное методами термохимии:

$$E_{ract} = N_{\min(Al/Ft)} \cdot q, \text{ Дж}. \quad (16)$$

Количество теплоты, затрачиваемой на доведение до температуры воспламенения 1 гр ДТ:

$$Q = C \cdot m \cdot (t_2 - t_1), \text{ Дж} \quad (17)$$

где t_1 - начальная температура; t_2 - конечная температура; C – средняя удельная теплоемкость для температурного интервала; m – масса.

Для определения эффективности зажигательного действия сборок № 1 и № 2 определим массу дизельного топлива, доведенного до воспламенения как:

$$m_{iDF} = \frac{E_{st}}{Q}, \text{ г.} \quad (18)$$

Результаты расчетов представлены на рис. 12 и 13.

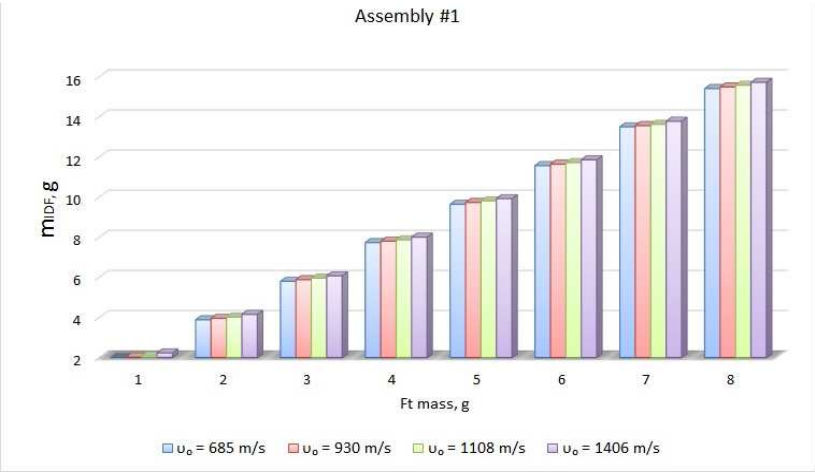


Рис. 12. Масса воспламененного ДТ в зависимости от массы Ft в сборке №1

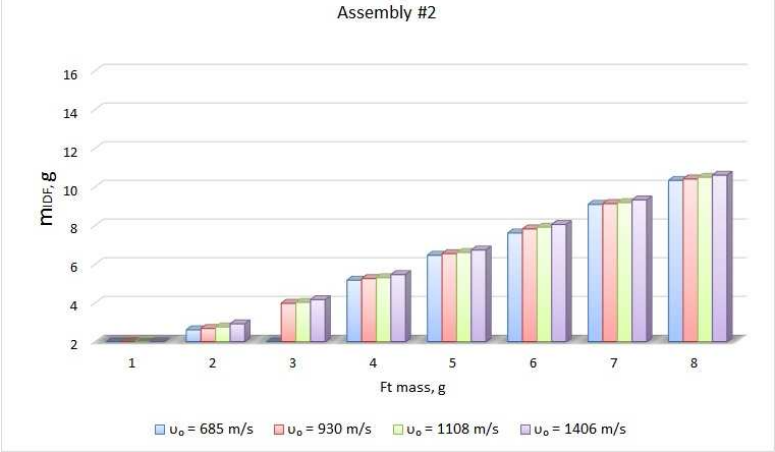


Рис. 13. Масса воспламененного ДТ в зависимости от массы Ft в сборке №2

Анализ полученных результатов показывает, что величина присоединенной массы дизельного топлива гораздо ниже массы топлива, доведенного до воспламенения при начальных скоростях свыше 930 м/с. Это подтверждает экспериментальные результаты, полученные для различных сборок ударников.

Полученные результаты расчетов по возможному весу воспламенненого дизельного топлива хорошо согласуются с результатами экспериментов, которые показывают устойчивое воспламенение и горение топлива под воздействием представленных сборок ударников.

Выводы. Проведенные исследования показали, что фторполимеры способны при условии динамического нагружения выделять количество энергии, достаточное для нагрева некоторого количества топлива до температуры самовоспламенения, что с высокой степенью вероятности приведет к воспламенению всего топлива в баке. Таким образом, создавая комбинированные ПЭ, включающие в свой состав фторопласт, алю-

миний или титан, на ряду с достаточным для поражения тонкостенных преград ударно-проникающим действием будут обладать высоким зажигательным запреградным действием.

Проведенные исследования по воспламенению одного из самых устойчивых к воспламенению топлив – дизельного топлива, дает право предположить, что применяемые в авиации легкие, обладающие высоким октановым числом топлива будут воспламеняться и при меньших скоростях взаимодействия. Но при этом скорости взаимодействия все равно должны быть выше критической скорости начала химической реакции между фторопластом и алюминием или титаном.

Список литературы

1. Пугачев А.К., Росляков О.А. Переработка фторопластов в изделия: Технология и оборудование. Л.: Химия, 1987. 168 с.

2. Фторполимеры / под ред. Л.А.Уолла. М.: Мир, 1975. 448 с.

3. Паншин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская Ц.С. Фторопласты. Л.: Химия, 1978. 230 с.

4. Промышленные фторорганические продукты. Справочник. СПб.: Химия, 1996. 544 с.

5. Горовой В.Р., Бильдюкевич Н.А., Чулков В.П. Производство пиротехнических составов. М.: Машиностроение. 1982. 296 с.

6. Токсикология фторорганических соединений и гигиена труда в их производстве / А.И. Корбакова, И.Д. Макулова, Е.Н. Марченко и др. М.: Медицина, 1975. 183 с.

7. Khmelnikov E.A., Styrov A.V., Smagin K.V., Kravchenko N.S., Rudenko V.L., Sokolov S.S., Svidinsky A.V. Study of high-speed interaction processes between fluoropolymer projectiles and aluminum and titanium-based targets, in International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, 2016. Vol. 1. P. 167-183.

8. Стыров А.В., Селиванов В.В. Экспериментальное исследование процесса взаимодействия алюминия с политетрафторэтиленом в условиях ударного нагружения // Proc. of Intern. Conference «Shock Waves in Condensed Matter». St.Petersburg, 1998. С. 133–134.

9. Стыров А.В., Селиванов В.В. Хим. физика. 1999. Т. 18. № 11. 72 с.

10. Лашков В.Н., Лобанов В.Н., Казаковский Н.Т. и др. // Proc. Intern. Conf. «Shock Waves in Condensed Matter». Russia, S-Pb, 1998. P. 139.

11. Miller P.J., Lindfors A.J. Intern. Workshop on New Models and Numerical Codes for Shock Wave Processes in Condensed Media.UK. Oxford, 1997. 75 p.

12. Davis J., Lindfors A., Miller P. et al. Proc. XIth Intern. Symp. on Detonation. USA. Colorado, 1998. 302 p.

13. Селиванов В.В., Имховик Н.А., Лашков В.Н., Селезенев А.А. Хим. физика. 2001. Т. 20. № 8. 80 с.

14. Khmelnikov E.A., Styrov A.V., Smagin K.V., Kravchenko N.S etc.; Defence Technology, 2015. Vol. 11. Issue 1. 56 p. DOI: 10.1016/j.dt.2014.09.006.

15. Khmelnikov E.A., Smagin K.V., Zavodova T.E. Application of the Methodology Counterflow Diffusion Flames // Modeling of the Terminal Ballistic Processes of Munitions Based on Reactionary Material. Proceedings 11th International High Energy Materials Conference & Exhibits. Vol. 1.Pune: High Energy Materials Society of India, 2017. Т. 1. P. 270-276.

16. Tsuji Hiroshi. Counterflow diffusion flames. Progress in Energy and Combustion Science. 1982. Volume 8. Issue 2. P. 93-119. DOI: 10.1016/0360-1285(82)90015-6.

17. Хмельников Е.А., Смагин К.В., Чванов А.Е. К вопросу о поражающем действии боеприпасов, содержащих реакционные материалы. Фундаментальные основы баллистического проектирования: VI Всероссийская научно-техническая конференция. Санкт-Петербург, 2018. С. 239-243.

18. Балаганский И.А., Мержиевский Л.А. Действие средств поражения и боеприпасов: учебник. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2004. 408 с.

19. Средства поражения и боеприпасы: учебник / Бабкин А.В., Велданов В.А., Грязнов Е.Ф. и др.; под общ. ред. Селиванова В.В. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.

Заводова Татьяна Евгеньевна, старший преподаватель, zavodovat.e@gmail.com, Россия, Нижний Тагил, Нижнетагильский технологический институт (филиал) ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

Хмельников Евгений Александрович, д-р тех. наук, заведующий кафедрой, khmelnikov7@gmail.com, Россия, Нижний Тагил, Нижнетагильский технологический институт (филиал) ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

Смагин Константин Владимирович, старший преподаватель, smaginkv@gmail.com, Россия, Нижний Тагил, Нижнетагильский технологический институт (филиал) ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

INCREASING OF SMALL CALIBER STRIKERS DESTRUCTIVE ACTION IN THE DEFEAT OF LIGHTLY ARMORED TARGETS

V.Yu. Shiryaeva, E.A. Khmelnikov, K.V. Smagin

The article deals with the possibility of increasing the damaging effects of small-caliber artillery ammunition in the fuel tanks of aircraft and helicopters. A comparison of the results of the calculation of the probability of the incendiary effect of strikers based on fluoropolymers on diesel fuel was made. The calculations were carried out using the methods of «Fragment Criterion» and «Energy Balance».

Key words: small caliber artillery; incendiary effect; fragment criterion; energy balance.

Zavodova Tatiana Evgenievna, senior lecturer, zavodovat.e@gmail.com, Russia, Nizhny Tagil, «Ural Federal University named after first President of Russia B.N. Yeltsin» Nizhny Tagil technological Institute (branch),

Khmelnikov Evgeny Alexandrovich, doctor of technical sciences, head of department, khmelnikov7@gmail.com, Russia, Nizhny Tagil, «Ural Federal University named after first President of Russia B.N. Yeltsin» Nizhny Tagil technological Institute (branch),

Smagin Konstantin Vladinirovich, senior lecturer, smaginkv@gmail.com, Russia, Nizhny Tagil, «Ural Federal University named after first President of Russia B.N. Yeltsin» Nizhny Tagil technological Institute (branch)

УДК 623.526

СУЩНОСТЬ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

А.А. Чурсин, В.В. Сятчихин

В статье рассматриваются основные понятия системы технического диагностирования вооружения. Определены системы технического диагностирования. Даны определения тестового и функционального диагностирования. Рассмотрены средства технического диагностирования. Выделены основные методики поиска неисправностей образцов вооружения. Это позволяет значительно сократить время ремонта вооружения.

Ключевые слова: техническое диагностирование, образцы вооружения, средства диагностирования, визуальная проверка, функциональная проверка, контрольные измерения.

В современных условиях войска национальной гвардии Российской Федерации характеризуются наличием большого количества вооружения и военной техники, отличающихся сложным устройством и многофункциональностью применения. Следовательно, достижения высоких качественных параметров образцов вооружения и военной техники неизбежно ведет к их значительному конструктивному усложнению. Данное обстоятельство затрудняет боевую деятельность личного состава и требует, наряду с совершенствованием новых форм и методов обучения, все шире использовать при контроле технического состояния образцов вооружения и военной техники современные средства диагностирования. Поэтому проблема эффективности использования средств диагностирования при контроле технического состояния образцов вооружения и военной техники в настоящее время остается актуальной. Здесь необходимо отметить, что совершенствование способов контроля технических параметров образцов вооружения и военной техники на основе применения современных средств диагностирования может существенно уменьшить время на подготовку образца к боевому применению и повысить время их службы.

Система технического диагностирования – это совокупность аппаратных, программных средств и объекта, необходимых для проведения диагностирования по правилам, установленным нормативно-технической и конструкторской (проектной) документацией [1].

Техническое диагностирование подразделяют на системы тестового и функционального диагностирования.

Тестовое диагностирование – это диагностирование объекта, производимое с помощью специальных тестовых воздействий и позволяющее проверить параметры объекта и причины их отклонения от заданных значений.

Функциональное диагностирование – это диагностирование объекта, производимое с помощью рабочих воздействий, которые позволяют контролировать исполнение объектом заданных функций при заданных параметрах и выявить причины нарушения его функционирования.

Результатом диагностирования является заключение о техническом состоянии объекта с указанием при необходимости места, вида и причин дефектов. Здесь под дефектом понимается несоответствие образца вооружения или его составных частей установленным требованиям [2].

Технические устройства, применяемые для обнаружения дефектов, принято называть «техническими средствами диагностики» или просто средствами диагностирования.

С ростом сложности современных военно-технических устройств процесс диагностики и поиска места неисправности представляет один из наиболее трудоемких этапов восстановления боеспособности образцов вооружения.

В настоящее время существует целый ряд методик, позволяющих существенно облегчить поиск неисправностей [3], например, разделение изделий на отдельные (имеющие законченное функциональное назначение) системы, агрегаты, узлы, блоки; вывод в целях оперативности контроля узловых точек схемы отдельного блока на панель управления; применение звуковой и световой сигнализации, указывающей на неисправность изделия или его составной части; введение дублирующих устройств, позволяющих отыскать неисправность методом сравнения; создание условия для обнаружения неисправностей путем наблюдения и сопоставления сигналов на экранах индикаторов, а также путем сравнения рабочих и эталонных сигналов; применение различного автоматического контроля параметров изделия с использованием принципа «в норме» - «не в норме» и др.

Следует также выделить четыре основных метода технической диагностики: визуальная проверка (внешний осмотр); функциональная проверка (измерение параметров); контрольные измерения; замена элементов.

Визуальная проверка заключается во внешнем осмотре элементов изделия и позволяет быстро по характерным внешним признакам (изменение цвета, степень нагрева, образование дыма, запах, излом, царапины) обнаружить явные неисправности. Однако визуальный осмотр не позволяет произвести детальную проверку изделия, что является основным его недостатком.

Функциональная проверка заключается в прямых или косвенных измерениях характеристик изделия с использованием специального оборудования и приборов. Функциональная проверка может включать в себя следующие этапы: прямые измерения характеристик (размеров геометрической формы, электрических параметров и т. п.); проверку составной части изделия (узла, блока и т. п.) на специальных стендах или с использованием специальных приборов (косвенная оценка); замену проверяемой части изделия исправной и проверку их прямых характеристик.

Функциональная проверка дает наиболее полное и точное представление о техническом состоянии изделия и его составных частей, однако для его осуществления требуется значительное время, а также применение специального технологического оборудования и приборов.

Контрольные проверки, как правило, не дают представления об общем состоянии изделия и естественно могут быть использованы только для определения отдельных технических характеристик некоторых элементов изделия.

Замена элементов является довольно распространенным методом поиска неисправных элементов и отдельных составных частей изделия. Замена элементов дает ограниченную информацию о техническом состоянии элемента (изделия) и позволяет сделать заключение о том, является ли замененный элемент или составная часть исправным или нет.

Таким образом, оптимальная методика отыскания неисправности представляет собой некоторую логическую последовательность действий, позволяющих постепенно сужать область неисправности до тех пор, пока искомый участок неисправности не будет локализован [4].

Можно определить общие принципы выбора конкретного метода поиска неисправности с учетом внешних признаков отказа, а также условий, предшествующих отказу [5]. Так, например, выбирая методику поиска, необходимо: исходить из минимальных затрат времени и наименьшего риска допустить ошибку; максимально исключать случайность и ошибочность полученных результатов; исходить из предлагаемой причины отказа; обеспечивать однозначность получаемых результатов; стремиться получить возможно больше информации, позволяющей устранить неисправность.

Большое разнообразие образцов вооружения и военной техники не позволяет предложить какой-то общий единый метод, на основе которого можно разрабатывать программы поиска для всех встречающихся частных случаев. Поэтому находит применение ряд методов. В зависимости от конструктивного выполнения образца вооружения может оказаться предпочтительней тот или иной из них или их комбинация.

При поиске неисправностей по любому методу осуществляется ряд проверок, в результате которых делается заключение о состоянии детали, узла или образца в целом.

В зависимости от числа деталей, определяющих результат одного шага проверки при поиске неисправностей, удобно различать подетальные проверки, в результате которых определяется состояние только одной детали (например, предохранитель, шептало, спусковой крючок, пружина, катушка, контакты и т. д.), и поузловые проверки, в результате которых определяется состояние узла или агрегата (например, прицельное приспособление) или в целом более крупной части образца вооружения (например, ствол, ствольная коробки) содержащие целые группы деталей.

Накопленный опыт эксплуатации вооружения в войсках дает возможность выделить три основных метода поиска неисправностей: метод последовательных подетальных проверок; метод групповых проверок; комбинационный метод.

Из вышеизложенного следует, что уровень показателей технического состояния образцов вооружения и военной техники закладывается на этапах разработки и производства соответствующих образцов, а на этапе эксплуатации лишь поддерживается в установленных пределах. Поэтому мониторинг и техническое диагностирование должны быть распространены на все этапы жизненного цикла образцов вооружения и военной техники. Иными словами, системное применение методов мониторинга и технического диагностирования, разработка и внедрение нового, современного оборудования и инструментов для технического диагностирования образцов вооружения и военной техники, а также правильное использование имеющихся средств технического диагностирования, инструментальной дефектовки, позволят более обоснованно учитывать специфику возникновения и интенсивность отказов в реальных условиях эксплуатации изделий, и тем самым позволят улучшить качество технического обслуживания образцов вооружения и военной техники, повысит их боевую готовность.

Таким образом, применение того или иного способа технического диагностирования образцов вооружения и военной техники зависит от конкретных условий. При отыскании неисправностей в образце вооружения необходимо разумно сочетать все основные способы, приведенные выше. Лишь при этом условии время, затрачиваемое на ремонт вооружения, может быть сведено к минимуму.

Список литературы

1. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1990. 11 с.

2. ГОСТ 27518-87. Диагностирование изделий. Общие требования. М.: Издательство стандартов, 1988. 5 с.

3. Техническая диагностика / под общей редакцией Клюева В.В. М.: Машиностроение, 1987.

4. Буренок В.М. Проблема создания системы управления полным жизненным циклом вооружения, военной и специальной техники // Вооружение и экономика. 2014. № 2 (27). С. 4–9.

5. Муралев А.А., Хамов А.А. Анализ технологической схемы технического обслуживания вооружения // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Калашниковские чтения». Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2018. С. 388–393.

Сятчихин Василий Викторович, канд. воен. наук, преподаватель, vasiliy490303@mail.ru, Россия, Пермь, Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации,

Чурсин Александр Антонович, доцент, chursinperm@mail.ru, Россия, Пермь, Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации

THE ESSENSE OF THE SISTEM OF TECHNICAL DIAGNOSTICS OF WEAPONS

V.V. Syatchihin, A.A. Chursin

The article discusses basic conceptsc of the sistem of technical diagnostics of weapons. Defines the sistems of technical diagnostics. The definitions of the test and functional diagnostics. Highlighted the main methods of troubleshooting weapons. This allows you to significantly reduce the repair time for weapons.

Key words: technical diagnostics, weapon samples, diagnostic tools, visual check, functional check, control measurements.

Siatchikhin Vasilii Victorovich, candidate of military sciences, lecturer, vasiliy490303@mail.ru, Russia, Perm, Perm Military Institute of the National Guard of the Russian Federation,

Chursin Alexandr Antonovich, docent, chursinperm@mail.ru, Russia, Perm, Perm Military Institute of the National Guard of the Russian Federation

УДК 623.526

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ СОХРАНЯЕМОСТИ ОБРАЗЦОВ ВООРУЖЕНИЯ

А.А. Муралев, А.Ю. Корноухов

В статье рассматриваются вопросы сохряняемости вооружения в процессе хранения и (или) транспортирования, а также вероятность сохранения его работоспособности после снятия с хранения для эффективного применения по прямому предназначению.

Ключевые слова: вооружение, сохраняемость, срок сохраняемости, ресурс, работоспособность.

В процессе хранения и транспортирования вооружение подвергается неблагоприятным воздействиям факторов окружающей среды, например, колебаниям температуры, воздействию влажного воздуха, вибрациям и т. п. В результате чего оно может оказаться в неработоспособном и даже в предельном состоянии. Сохраняемость вооружения характеризуется его способностью противостоять отрицательному влиянию условий и продолжительности его хранения и транспортирования [1]. Для оценки сохраняемости технических изделий согласно ГОСТ 27.002-2015 установлены средний срок сохраняемости и гамма-процентный срок сохраняемости.

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости [2]. При наличии данных о сроках сохраняемости наблюдаемых образцов статистическая оценка среднего срока сохраняемости определяется выражением:

$$\tau_c = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} c_i, \quad (1)$$

где τ_c– срок сохраняемости *i*-го образца, год.

При усеченной выборке средний срок сохраняемости устанавливается с учетом закона распределения срока сохраняемости образцов:

$$\tau_c = \int_0^{\infty} (\tau_c f)\,d\tau_c = \int_0^{\infty} [1 - F(\tau_c)]\,d\tau_c, \quad (2)$$

где $F(\tau_c)$ – функция распределения срока сохраняемости; $f(\tau_c)$ – плотность распределения срока сохраняемости.

Под сроком сохраняемости образцов вооружения следует понимать календарную продолжительность их эксплуатации, в течение которой значения заданных показателей безотказности, долговечности и ремонтопригодности сохраняются в установленных пределах. Календарная продолжительность эксплуатации вооружения охватывает этапы содержания их при длительном или кратковременном хранении (с учетом проведения необходимого технического обслуживания и выполнения работ регламентного технического обслуживания, объем которого установлен в нормативно-технической документации) и последующем использовании в оперативном режиме [3].

В практике эксплуатации образцов вооружения в качестве оценочного показателя сохраняемости в настоящее время используется назначенный срок сохраняемости $\tau_c^н$, определяющий календарную продолжительность содержания образца вооружения на хранении, по истечении которой должен быть предусмотрен их заводской ремонт. Величина $\tau_c^н$ установлена исходя из следующих соображений. В соответствии с существующими принципами эксплуатации вооружения в мирное время предусматривается обязательная отработка назначенного ресурса до капитального ремонта $S_c^н$ образцами, состоящими на вооружении частей и соединений, за время, соответствующее началу массового выхода из строя медленностареющих элементов образцов, восстановить работоспособность которых можно только в заводских условиях. Кроме того, при включении в тактико-технические требования величины назначенного срока сохраняемости образца учитывается необходимость проведения после определенного времени модернизации в заводских условиях, эксплуатируемых в войсках образцов вооружения, с целью повышения уровня их боевых и эксплуатационных свойств и обеспечения превосходства над новыми однотипными образцами, поступающими на вооружение армий вероятного противника [4].

Гамма-процентный срок сохраняемости – срок сохраняемости, достигнутый образцом с заданной вероятность γ, выраженный в процентах [2]. Данный показатель определяется из соотношения:

$$1 - F\left(\tau_{c\gamma}\right) = \frac{\gamma}{100}, \tag{3}$$

где $\tau_{c\gamma}$ – гамма-процентный срок сохраняемости, год.

Для определения экспериментальным путем гамма-процентного срока сохраняемости ведутся наблюдения за выборкой образцов Nв заданных условиях их эксплуатации. При этом определяются сроки сохраняемости каждого образца, которые располагаются в виде вариационного ряда по убывающей величине, τ_{c1}, τ_{c2}, …, τ_{ci},…, τ_{cN}. Затем выявляется член этого ряда с порядковым номером:

$$N_{\tau c\gamma} = \frac{N\gamma}{100} + 0{,}5, \tag{4}$$

где γ– заданная регламентированная вероятность, %.

Срок сохраняемости образца, имеющего порядковый номер $N\tau_{c\gamma}$, является гамма-процентным сроком сохраняемости наблюдаемой партии образцов вооружения. Если результатом расчета будет не целое число, то гамма-процентный срок сохраняемости подсчитывается по уравнению:

$$\tau_{c\gamma} = \tau_{ci} - \left(\tau_{ci} - \tau_{ci+1}\right)\left[N_{\tau ci} - N_{\tau ci+1}\right], \tag{5}$$

где τ_{ci}– срок сохраняемости образца, соответствующего порядковому члену $N_{\tau ci}$ вариационного ряда, год; τ_{ci+1}–срок сохраняемости образца, соответствующего порядковому члену $N_{\tau ci+1}$ вариационного ряда, год; $N_{\tau ci}$, $N_{\tau ci+1}$– соответственно ближайший меньший и ближайший больший порядковые члены вариационного ряда относительно расчетного: $N_{\tau ci+1} > N_{\tau c\gamma} > N_{\tau ci}$.

Основной задачей исследования сохраняемости вооружения является прогнозирование способности образца выполнять поставленные задачи в пределах установленной наработки до выхода в капитальный ремонт после прекращения его хранения и перевода в режим оперативного использования. Однако приведенные в ГОСТ 27.002-2015 показатели сохраняемости не раскрывают в полной мере основных аспектов этого свойства (оценивают его только в процессе хранения) и не учитывают, в частности, специфики войсковой эксплуатации образцов вооружения. Поскольку для всесторонней характеристики сохраняемости вооружения имеющаяся номенклатура его оценочных показателей явно недостаточна, возникает необходимость в обосновании дополнительных показателей, учитывающих как условия содержания образцов на хранении, так и последующего их непрерывного использования по назначению. К числу показателей, характеризующих сохраняемость вооружения, следует отнести срок отработки образцом назначенного ресурса до капитального ремонта $\tau_{кр}^{н}$. Данный показатель учитывает календарную продолжительность эксплуатации образца с момента выпуска его заводом промышленности до выхода в капитальный ремонт после отработки установленной наработки. В реальных условиях эксплуатации вооружения время его отработки $S_{кр}^{н}$ распределяется в широких пределах в зависимости от продолжительности содержания образца в составе различных групп эксплуатации. Величина $\tau_{кр}^{н}$ может иметь предельные значения при соответствующих вариантах использования образцов в войсках. При начале эксплуатации вооружения с годовой нормой настрела 2*X*», срок отработки образцом назначенного ресурса до капитального ремонта будет минимальным:

$$\tau_{кр\,\min}^{н} = \frac{S_{кр}^{н}}{2X''}, \qquad (6)$$

где *X''* – максимальная годовая норма настрела образцом, количество выстрелов.

Использование показателя $\tau_{кр\,\min}^{н}$ при исследовании и оценке сохраняемости вооружения дает возможность установить влияние продолжительности эксплуатации вооружения на характер и закономерности возникновения отказов в работе его элементов, связанных со старением, усталостными явлениями и коррозией конструкционных материалов. Кроме того, зная сроки отработки образцом $S_{кр}^{н}$ и средние сроки сохраняемости элементов, можно заранее сделать заключение о целесообразности учета сохраняемости при оценке надежности вооружения.

Боеготовое состояние вооружения, содержащегося на хранении, в значительной степени зависит от сохранения работоспособности его устройств и систем, обеспечивающих в первую очередь боеспособность образца. Опыт эксплуатации вооружения в войсках показывает, что при снятии с хранения с ограничением по времени эксплуатации образцов могут возникнуть отказы в работе их отдельных устройств, для устранения которых требуются затраты времени, превышающие установленные нормативы на вывод образца в назначенный район сбора. Поэтому для оценки приспособленности вооружения с течением времени к сохранению заданного уровня эксплуатационных свойств (сохраняемости, безотказности, подготавливаемости) и его готовности к выполнению задания в ограниченные сроки целесообразно использовать вероятность сохранения работоспособности P_c.

Для описания зависимости показателя P_c от значений различных его составляющих применяется коэффициент готовности выполнения задания. С помощью данного коэффициента определяется вероятность успешно выполненных заданий образцом за соответствующий период без каких-либо отказов, для устранения которых требуется время, превышающее установленный его лимит для восстановления (то есть предельно допустимое время).

Показатель «вероятность сохранения работоспособности» можно представить, как вероятность того, что после установленного срока эксплуатации образца при снятии с хранения на нем не возникнут отказы, связанные со старением, усталостными явлениями, коррозией, время устранения которых превышает предельно допустимое в данный момент время ремонта

$$P_c = \exp\left(- w_{nx} \tau_x e^{\frac{-T_{dx}}{T_{впх}}} \right), \quad (7)$$

где w_{nx}– параметр потока отказов образца, связанных со старением, усталостными явлениями, коррозией и приводящих к полной потере его работоспособности, 1/год;τ_x– продолжительность эксплуатации (хранения) образца, год; $T_{дх}$ – предельно допустимые затраты времени, отводимые на восстановления образца при снятии его с хранения, ч; $T_{впх}$ – среднее время восстановления образца при рассматриваемой продолжительности эксплуатации, требуемое для устранения отказов по причинам старения, усталостных явлений, коррозии, ч.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что характерной особенностью сохраняемости, как свойства надежности изделий вооружения является то, что проверить и оценить ее можно только в процессе эксплуатации этих изделий [5]. Приведенные зависимости позволяют произвести оценку сохряняемости вооружения в процессе хранения и транспортирования.

Список литературы

1. Чухнин В.Н. Теоретические основы надежности вооружения. Учебное пособие. Пенза: ПАИИ, 2004.

2. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 2015. 63 с.

3. Москалев В.С. Сохраняемость вооружения и военной техники сухопутных войск при их длительном хранении. Учебное пособие. М.: МО, 2003.

4. Буравлев А.И., Пьянков А.А. Управление техническим обеспечением жизненного цикла вооружения и военной техники. М.: Граница, 2015. 304 с.

5. Вольф И.Г., Муралев А.А., Ихтисанов И.И. Стратегии управления техническим состоянием изделий вооружения на стадии эксплуатации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 4. С. 167-172.

Муралев Андрей Александрович, канд. пед. наук, доцент, muralev-a@mail.ru, Россия, Пермь, Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации,

Корноухов Алексей Юрьевич, преподаватель, muralev-a@mail.ru, Россия, Пермь, Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации

ON THE QUESTION OF ASSESSMENT OF THE SAFETY OF SAMPLES OF WEAPONS

A.A. Muralev, A.Yu. Kornouhov

The article discusses the issues of the preservation of weapons during storage and (or) transportation, as well as the likelihood of maintaining its performance after removal from storage for effective use for its intended purpose.

Key words: weapons, preservation, shelf life, resource, operability.

Muralev Andrey Alexandrovich, candidate of pedagogical sciences, docent, muralev-a@mail.ru, Russia, Perm, Perm Military Institute of the National Guard of the Russian Federation,

Kornouhov Aleksey Yurevich, lecturer, muralev-a@mail.ru, Russia, Perm, Perm Military Institute of the National Guard of the Russian Federation

УДК 159.94

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ УЧЕБНЫХ ЗАДАЧ НА ТРЕНАЖЕРЕ ПТРК

В.В. Сигитов, А.И. Ковинько, Е.А. Романюта

Предложена методика выбора порядка следования задач по показателям их сложности и однотипности. Показано, что последовательность отработки однотипных учебных задач должна устанавливаться с учетом обеспечения максимально возможного положительного переноса навыков.

Ключевые слова: тренажер, учебная задача, оператор ПТРК.

На эффективность процесса обучения операторов ПТРК существенное влияние оказывает последовательность выполнения учебных задач [1], которая должна определяться с учетом обеспечения максимально возможного переноса навыков. Решению задачи определения такой последовательности посвящен ряд работ [1-9]. Представляет определенный интерес определение методики выбора порядка следования задач по показателям их сложности и однотипности.

В соответствии с [7], последовательность отработки разнотипных (не содержащих идентичных операций деятельности) учебных задач должна устанавливаться по принципу «от простого – к сложному», сводя к минимуму опасность возникновения отрицательного переноса и интерференции навыков. Выполнение этого принципа можно проследить по росту показателя сложности γ_j предъявляемых оператору задач

$$\gamma_{j1} > \gamma_{j2} > \gamma_{j3} > \ldots > \gamma_{jn}. \quad (1)$$

В общем случае сложность задачи определяют из выражения:

$$\gamma_j = \gamma_{0j} A_t \frac{L}{Z}, \quad (2)$$

где γ_{0j} – коэффициент пропорциональности; A_t – показатель темповой напряженности деятельности; L – нормированный показатель логической сложности алгоритма учебной задачи, определяемый из выражения:

$$L = \frac{1}{N^*} \sum_{j=1}^{n_л} \frac{m_{лj}^2}{m_л};$$

где N^* – число элементарных операций и логических условий в алгоритме; $m_{лj}$ – число логических условий в j-й комплексной группе ($i = \overline{1, n_0}$); $n_л$ – число непрерывных групп логических условий в алгоритме; $m_л$ – число элементарных операций и логических условий алгоритмов в j-й комплексной группе ($i = \overline{1, n_0}$).

При этом под комплексной группой понимается одна непрерывная группа логических условий и следующая за ней одна непрерывная группа элементарных операций.

В соотношении (2) Z – нормированный показатель стереотипности учебной задачи, рассчитываемый по формуле:

$$Z = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n_0}\frac{m_{0i}^2}{M_i},$$

где N – общее количество элементарных операций и логических условий в алгоритме; n_0 – число непрерывных групп элементарных операций в алгоритме; m_{0i} – число элементарных операций в i-й комплексной группе ($i=\overline{1,n_0}$); M_i – суммарное число элементарных операций и логических условий в i-й комплексной группе ($i=\overline{1,n_0}$).

Комплексная группа включает одну непрерывную группу элементарных операций и следующую за ней одну непрерывную группу логических условий.

Последовательность отработки однотипных учебных задач должна устанавливаться с учетом обеспечения максимально возможного положительного переноса навыков. Количественно меру совпадения элементарных операций в учебных задачах, характеризующих перенос навыков, необходимо вычислять с помощью показателя K_J однотипности j-й задачи по формуле:

$$K_j = \frac{\sum_{m=1}^{l} Z_{mj}S_{mj}}{\sum_{i=1}^{n} Z_{ij}S_{ij} + \sum_{m=1}^{l} Z_{mj}S_{mj}}, \qquad (3)$$

где l – число совпадающих (несовпадающих) элементарных операций деятельности в базовой (сравниваемой) и отрабатываемой задаче; m – номер совпадающих (несовпадающих) операций в j-й задаче; $S_{mj}(S_{ij})$ – коэффициент веса совпадающей (несовпадающей) операции; $Z_{mj}(Z_{mj})$ – коэффициент совпадения (несовпадения) операции.

Коэффициент веса совпадающей (несовпадающей) операции (S_{ij}) определяют методом экспертных оценок [8] следующим образом:

$Z_{mj} = 1$, $Z_{ij} = 0$, если операции совпадают полностью;

$Z_{mj} = Z_{ij} = 0{,}5$, если операции совпадают частично;

$Z_{mj} = 0$, $Z_{mj} = 1$, если операции не совпадают.

На неверное установление последовательности отработки однотипных учебных задач укажет снижение значения показателя K_j по ходу построенного ряда.

Рассмотрим, как предъявляются оператору практические учебные задачи в процессе обучения на тренажере 9Ф660-2 ПТРК «Корнет».

Анализ характера учебных задач в последовательности предъявления на тренажере позволил выделить группы сходных задач:

группа Н – начальный уровень сложности (С-1…С-4) – для привития начальных навыков управления;

группа I – первый уровень сложности (С-5…С-8) – для развития точности и координации управляющих движений оператора;

группа II – второй уровень сложности II (С-9…С-19) – для развития и совершенствовали навыков двухкоординатного сопровождения целей;

группа III – третий уровень сложности III (С-20…С-23) – для совершенствования и доведения до автоматизма навыков двухкоординатного сопровождения целей (в задачах С-21…С-23 цель групповая).

Оценим соответствие требованиям [7] последовательности предъявления разнотипных по уровню сложности групп учебных задач на электронном тренажере.

Перед проведением расчетов примем ряд допущений:

1. Оператор ПТРК выполняет задачи поражения цели «традиционным» способом.

2. При определении сложности задач коэффициент пропорциональности $\gamma_{0j} = 1$.

3. Выполнение учебных задач происходит без ограничения времени.

Исходя из характера движения цели и ответных действий оператора, представим алгоритм выполнения задач начального уровня сложности в виде комплексных групп (рис. 1).

Представление алгоритма выполнения задач первого уровня сложности в виде комплексных групп показано на рис. 2. Как видно из рис., с усложнением характера движения цели растет длина цепи *j*-х и *i*-х комплексных групп, что объясняется возникновением дополнительных условий выполнения алгоритма.

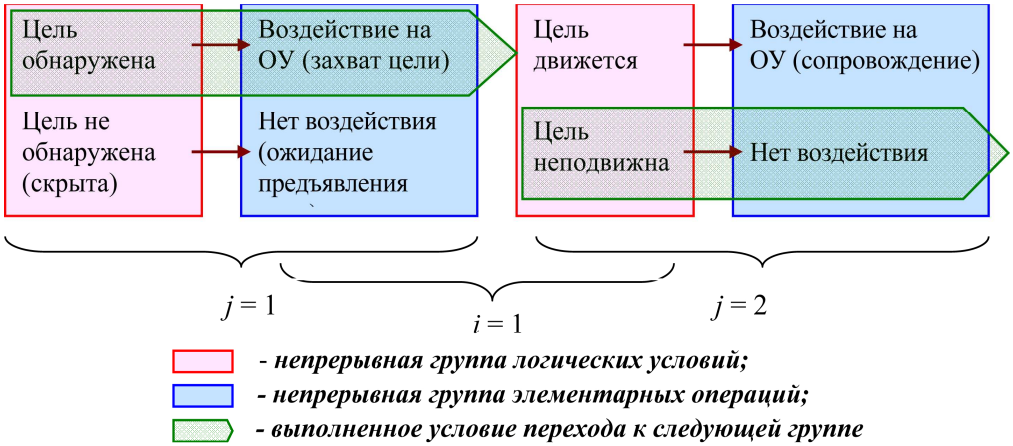


Рис. 1. Представление алгоритма выполнения задач для привития начальных навыков управления в виде j-х (i-х) комплексных групп

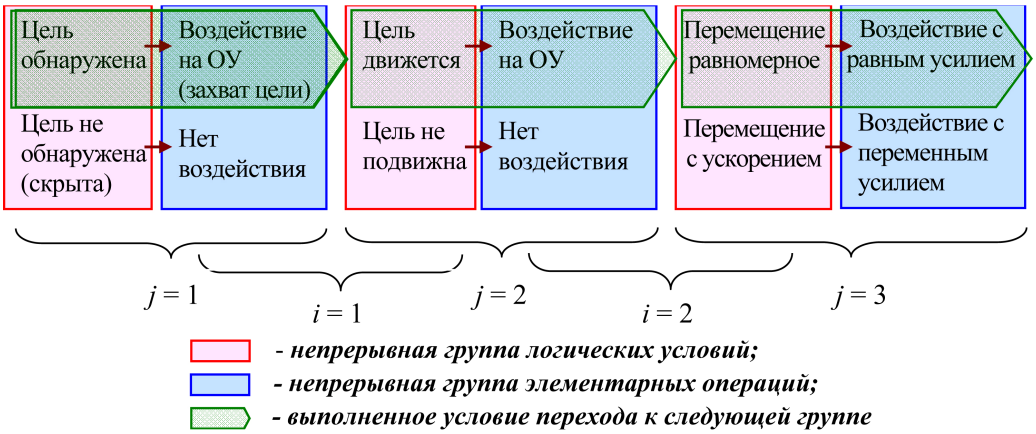


Рис. 2. Представление алгоритма выполнения задач первой группы сложности в виде j-х (i-х) комплексных групп

Представление алгоритма выполнения задач второго и третьего уровней сложности в виде комплексных групп производится аналогично.

Для определения сложности задач в каждой группе будем использовать выражение (1). Показатель темповой напряженности деятельности оператора для всех задач обучения на основании допущения 3 примет значение $A_t = 1$.

Анализ механизма формирования комплексных групп показал, что учебные задачи С-9, С-10, С-18, С-20 необоснованно отнесены к выделенным по уровню сложности группам. Показатель сложности γ_j для задач С-9, С-10, С-18 и С-20 принимает значение 9,7; 9,7; 9,3 и 9,3 соответственно, что позволяет отнести их к задачам первого уровня сложности и указывает на необходимость переформирования I, II и III групп учебных задач.

Таким образом, выполнение принципа (1) для переформированных групп учебных задач с различным уровнем сложности будет выглядеть следующим образом:

$$8{,}8H > (9{,}3-9{,}7)\text{I} > 10{,}1\text{II} > 13{,}4\text{III}.$$

Рассмотрим последовательность предъявляемых оператору однотипных учебных задач внутри группы. При этом будем понимать, что оператор воспринимает имитируемый тренажером целевой объект, движущийся на определенной дальности с некоторой скоростью, в виде перемещающейся в поле зрения визира геометрической фигуры, имеющей в каждом предъявлении различные угловые размеры. Представим перемещение целей в координатах «рубеж – угловое перемещение». На рис. 3 показано перемещение целей в задачах начального *H* и первого I уровня сложности.

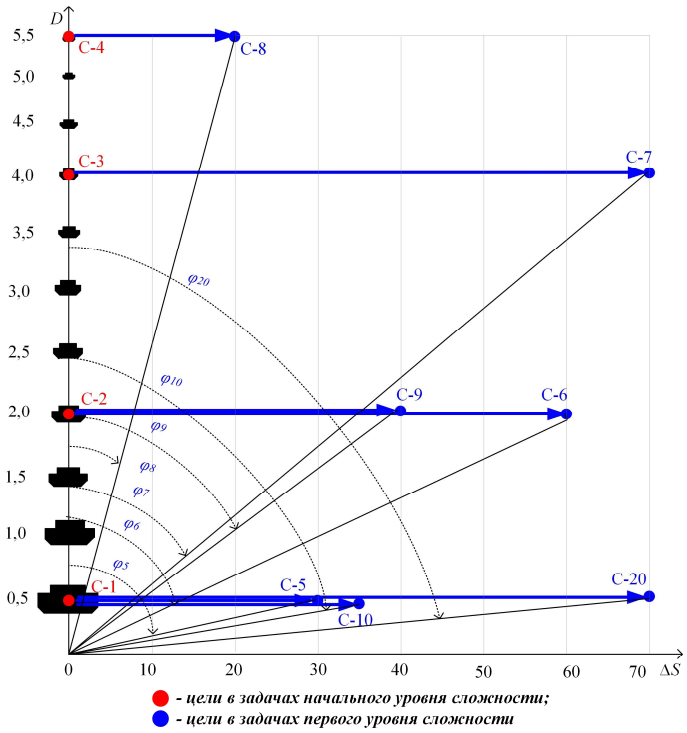


Рис. 3. Перемещение целей в задачах начального и первого уровня сложности в координатах «рубеж – угловое перемещение»

Под базовой задачей будем понимать первую задачу в каждой группе предъявляемых учебных задач, и с её элементарными операциями будем проводить сравнение. Под элементарной операцией будем понимать единичное воздействие оператора на ОУ, в ответ на появление ошибки рассогласования марки прицела и цели (реакция на выход марки за контуры цели).

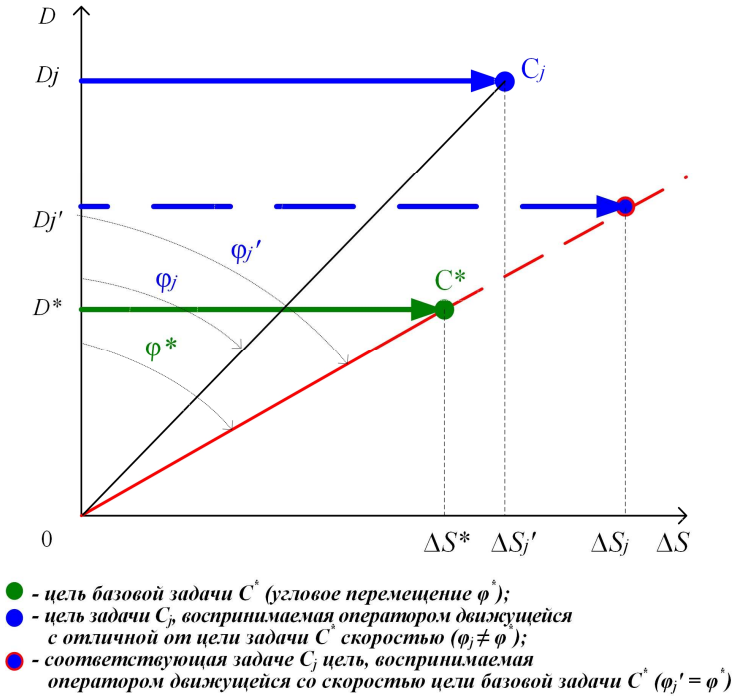
Логические рассуждения построим следующим образом. В деятельности оператора при выполнении учебной задачи были выделены фазы дискретного и непрерывного слежения. При этом было показано, что скорость перемещения цели неоднозначно влияет на характер исполнительных действий оператора в этих фазах. Из этого следует, что адекватно сравнить возможно лишь оцениваемую *j*-ю и базовую задачи, в которых угловые перемещения целей равны. На рис. 1 из всех представленных задач к таким задачам относятся лишь С-1…С-4 ($\varphi_j = 0$).

В такого рода задачах управляющие движения оператора, приходящиеся на фазу дискретного слежения, однотипны, и ими при сравнении учебных задач можно пренебречь. Число элементарных операций в фазе непрерывного слежения примем пропорциональным времени слежения, которое можно будет оценивать дальностью до цели. В то же время, число элементарных операций будет обратно пропорционально воспринимаемым оператором угловым размерам цели, которые, в свою очередь, обратно пропорциональны дальности до неё. Тогда, соотношение числа *Y* элементарных операций в *j*-ой и базовой задаче будет определяться зависимостью:

$$Y_j = \left(\frac{D_j}{D^*}\right)^2 \cdot Y^* \quad \text{при} \quad \varphi_j = \varphi^*;\ Y = 1 + n. \tag{4}$$

Очевидно, что операции в *j*-ой и базовой задаче будут совпадать частично. Тогда $Z_{mj} = Z_{ij} = 0{,}5$.

Поскольку в задачах I, II и III групп сложности угловые перемещения целей различны, необходимо определить зависимость, связывающую изменения дальности и перемещения целей в предположении, что все цели в задачах группы будут восприниматься оператором перемещающимися со скоростью цели базовой задачи (рис. 4).



- цель базовой задачи C^* (угловое перемещение φ^*);
- цель задачи C_j, воспринимаемая оператором движущейся с отличной от цели задачи C^* скоростью ($\varphi_j \neq \varphi^*$);
- соответствующая задаче C_j цель, воспринимаемая оператором движущейся со скоростью цели базовой задачи C^* ($\varphi_j' = \varphi^*$)

Рис. 4. Восприятие оператором движения целей базовой и отличной от базовой задач в координатах «рубеж – угловое перемещение»

Как видно из рис. 4, дальность до цели в *j*-ой задаче при условии $\varphi_j = \varphi^*$, определится выражением:

$$D_j^{/} = \frac{D_j \cdot \Delta S_j}{\Delta S_j^{/}}$$

и с учетом того, что $\frac{\Delta S_j^{/}}{D_j^{/}} = \operatorname{tg} \varphi^*$, преобразуется к виду:

$$D_j^{/} = \sqrt{\frac{D_j \cdot \Delta S_j}{\operatorname{tg} \varphi^*}}. \tag{5}$$

Используя выражение (4) и (5), легко получить зависимость числа *Y* элементарных операций в *j*-ой и базовой задаче $Y_j = f(Y^*)$:

$$Y_j = \left(\frac{D_j}{D^*} \cdot \frac{\Delta S_j}{\Delta S^*}\right)^2 \cdot Y^* \quad \text{при} \quad \varphi_j \neq \varphi^*;\ Y_j = 1 + n. \tag{6}$$

Покажем практическое применение полученных и приведенных в [9] зависимостей на примере определения последовательности отработки учебных задач первого уровня сложности.

За базовую задачу в группе I принята задача С-5. Применим выражение (6) для определения зависимости числа Y элементарных операций в задаче С-6 и базовой задаче С-5.

Применив выражение (3), с учетом равенства $Z_{mj} = Z_{ij} = 0{,}5$, рассчитаем значение показателя однотипности K_j задачи С-6:

$$K_6 = \frac{0{,}5 \cdot Y^* S_{mj}}{0{,}5(Y_6 - Y^*)S_{ij} + 0{,}5 \cdot Y^* S_{mj}}.$$

Коэффициенты веса совпадающей S_{mj} и несовпадающей S_{ij} операции в соответствии с [9] предполагается определять при помощи метода экспертных оценок. Поскольку предшествующее некоторой совпадающей или несовпадающей элементарной операции появление ошибки рассогласования марки прицела и цели на любом из участков слежения может повлиять в равной мере на исход решаемой учебной задачи (например, выход марки за контуры цели до касания земли – задача не выполнена), коэффициенты S_{mj} и S_{ij} принимаем равными.

С учетом изложенного, получим $K_6 = 0{,}016$. В ходе аналогичных расчетов получены показатели однотипности задачи С-7 – $K_7 = 0{,}003$, и задачи С-8 – $K_8 = 0{,}019$. Составим ряд из коэффициентов K_j в порядке предъявления задач группы на тренажере. Получим: 1; 0,016; 0,003; 0,019.

Как видно, значения коэффициентов K_j расположены не по убывающей последовательности. Удовлетворяющий требованиям [9] ряд должен иметь вид: 1; 0,019; 0,016; 0,003, что указывает на необходимость изменения порядка предъявления тренажером учебных задач с целью выполнения их в следующем порядке: С-5; С-8; С-6; С-7.

С использованием предложенного методического аппарата рассчитаны значения коэффициентов однотипности K_j для учебных задач других групп.

Таким образом, предъявляемая тренажером 9Ф660-2 последовательность учебных задач не в полной мере удовлетворяет требованиям РД В 50-616-86 к порядку следования задач по показателям их сложности и однотипности. Предложенный методический аппарат позволил определить последовательность отработки оператором ПТРК учебных задач на тренажере с учетом обеспечения максимально возможного положительного переноса и исключения интерференции приобретаемых навыков.

Список литературы

1. Сигитов В.В. Эргономическая оценка тренажеров и профессиональный отбор операторов управляемого вооружения. Тула: ТулГУ, 2010. 332 с.

2. Лискин В.М. Тренажеры огневой подготовки операторов управления вооружением. М.: 1988. 101 с.

3. Военно-экономический анализ / Под ред. С.Ф. Викулова. М.: Воениздат, 2001. 350 с.

4. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М. Высшая школа, 2001. 208 с.

5. Теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 744 с.

6. Кувшинов В.В., Логвинов С.С., Мальцев В.А. Физико-математическое моделирование и оценка качества функционирования военных эргатических систем «оператор-тренажер ПТРК». Тула: ТулГУ, 2004. 136 с.

7. РД В 50-616-86. Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения. Методы и организация обучения и тренировки операторов. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 1987. 16 с.

8. Литвак Б.Г. Экспертные оценки и принятие решений. М.: Патент, 1996. 271 с.

9. Курс подготовки артиллерии (КПА-93): Введ. в действие приказом главнок. СВ 11.12.1993. М.: Воениздат, 2001. Ч. 1. 70 с.

Сигитов Виктор Валентинович, д-р техн. наук, советник генерального директора по УТС ПВО и информационным технологиям, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тула, АО ЦКБА,

Ковинько Андрей Иванович, заместитель начальника отдела, cdbae@cdbae.ru, Россия, Москва, Главное управление вооружения Вооруженных Сил МО РФ,

Романюта Александр Евгеньевич, начальник, cdbae@cdbae.ru, Россия, Москва, ФГБУ «46 ЦНИИ» МО РФ

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE SEQUENCE OF TRAINING TASKS ON THE ATGM SIMULATOR

V.V. Sigitov, A.I. Kovinko, E.A. Romanyuta

A method for selecting the order of tasks according to their complexity and uniformity is proposed. It is shown that the sequence of working out the same type of training tasks should be set taking into account the maximum possible positive transfer of skill.

Key words: simulator, training task, ATGM operator.

Sigitov Viktor Valentinovich, doctor of engineering sciences, advisor to the general director, cdbae@cdbae.ru, Russia, Tula, JSC CDBAE,

Kovinko Andrey Ivanovich, deputy head of department, cdbae@cdbae.ru, Russia, Moscow,

Romanyuta Aleksandr Evgenievich, head, cdbae@cdbae.ru, Russia, Moscow, FGBI «46 CSRI»

УДК 621.317.39

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-КОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ В РАЗНЕСЕННОЙ MIMO РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

А.И. Полубехин, А.В. Петешов, В.Л. Румянцев

Рассмотрены различные варианты обработки эхо-сигналов в пространственно-когерентной MIMO системе. Представлена модель зондирующего сигнала в радиолокационных системах в виде импульсов, модулированных бинарными или многофазными кодовыми последовательностями. Приведены обобщенные структурные схемы алгоритмов централизованной обработки сигналов в многопозиционной пространственно- когерентной MIMO системе обнаружения для случая независимых флуктуаций эхо-сигналов. Результаты могут быть использованы для оценки энергетических характеристик различных типов перспективных MIMO РЛС.

Ключевые слова: радиолокационная система, пространственная когерентность, отношение правдоподобия.

В настоящее время широко применяются так называемые MIMO РЛС [1 – 6], важным достоинством которых является возможность превращения передающей антенны в обычную ФАР в режиме сопровождения, когда необходимо концентрировать энергию излучения на обнаруженной цели.

В литературе рассмотрение оптимальных алгоритмов обнаружения целей с учетом когерентности излучаемых сигналов рассмотрены недостаточно. Поэтому цель работы заключается в попытке восполнить указанный выше пробел.

Будем полагать, что разнесенная MIMO радиолокационная система состоит из M_{tr} передающих и M_{rec} приемных позиций. На каждой позиции мощность передающего устройства составляет P_{tr_i} ($i = 1 \ldots M_{tr}$). В качестве зондирующих сигналов используется ансамбль из M_{tr} ортогонально модулированных широкополосных сигналов. Тип модуляции зондирующих сигналов может быть фазовый (бинарными или многофазными кодовыми последовательностями), частотный (частотно-ортогональные сигналы) или комбинированный. Будем полагать, что на каждой приемной позиции может осуществляться прием всех M_{tr} зондирующих сигналов. Рассмотрим варианты централизованной обработки сигналов в многопозиционной MIMO радиолокационной системе в зависимости от типа модуляции зондирующих сигналов и вида пространственной и временной когерентности принимаемых на позициях сигналов.

Представим зондирующий сигнал в пространственно-когерентных многопозиционных радиолокационных системах в виде последовательности из L импульсов, модулированных бинарными или многофазными кодовыми последовательностями. Тогда модель сигнала на входе k-го приемного устройства может быть представлена в виде

$$\dot{Y}_k(t) = \sum_{i=1}^{M_{tr}} \sum_{l=1}^{L} \alpha_{ki} \dot{\xi}_{ki} \sqrt{P_i} S_i(t - \tau_{ki} - (l-1)T_p) \exp\{j[2\pi(f_o + F_{Dki}) \times \times (t - \tau_{ki} - (l-1)T_p + \theta_i(t))]\} + n_k(t), \quad (1)$$

где α_{ki} – канальный параметр сигнала, определяющий энергетические параметры сигнала на трассе распространения от передатчика до цели и от цели до приемного устройства

$$\alpha_{ki} = \sqrt{\frac{G_{tr} G_{rec} \lambda^2}{(4\pi)^3 R_{tr}^2 R_{\text{rec}}^2}};$$

G_{tr}, G_{rec} – коэффициент усиления передающей и приемной антенны РЛС соответственно; λ – длина волны; R_{tr}, R_{rec} – дальность трассы распространения сигнала «передатчик-цель» и «цель-приемник» соответственно; $\dot{\xi}_{ki}$ – комплексный коэффициент, учитывающий радиолокационные характеристики цели (диаграмму обратного рассеяния) при облучении цели i-м передающим устройством в направлении k-го приемного устройства;

$$\dot{\xi}_{ki} = \xi_{ki} \exp\{\varphi_{t\,ki}\};$$

ξ_{ki} – амплитудный множитель(в общем случае случайный) диаграммы обратного рассеяния цели; $\varphi_{t\,ki}$ – фазовый множитель (в общем случае случайный) диаграммы обратного рассеяния цели; P_i – мощность i- го передающего устройства; $S_i(t)$ – нормированная огибающая сигнала; $\tau_{ki} = (R_{tr\,i} + R_{rec\,k})/c$ – задержка сигнала на трассе распространения от i-го передающего устройства к k-му приемному устройству; T_p – период посылок импульсов; F_{Dki} – частота Доплера сигнала от i-го передающего устройства на k-м приемном устройстве; $\theta_i(t)$ – закон фазовой модуляции зондирующего сигнала; L – количество накапливаемых импульсов в пачке.

Рассмотрим вариант приема и обработки сигналов в пространственно-когерентной многопозиционной MIMO системе. Для многопозиционной системы с пространственной когерентностью случайный фазовый множитель сигнала $\varphi_{t\,ki}$ жестко связан для сигналов всех передающих позиций [1, 2].

Известно, что структура оптимального обнаружителя сигнала определяется отношением правдоподобия (или логарифмом отношения правдоподобия) исходя из статистических характеристик принимаемой смеси сигнала и шума и только шума. Учитывая выполнение условия пространственной когерентности принимаемых сигналов от различных передающих устройств на приемных позициях, можно полагать, что комплексные коэффициенты $\dot{\xi}_{ki}$ в сигналах от различных передатчиков будут коррелированы [3, 4]. Представим совместную плотность распределения принимаемых сигналов на *k*-ой приемной позиции с учетом ортогональности сигналов различных передающих позиций в виде:

$$p\left(\dot{Y}(t)\right)=\prod_{i=1}^{M_{tr}}\prod_{l=1}^{L}p\left(\dot{Y}_i(t-(l-1)T_p)\right)=$$

$$=\prod_{i=1}^{M_{tr}}\prod_{l=1}^{L}\frac{1}{\pi^n\left|\det(\dot{\Phi}_i)\right|}\exp\left\{-\dot{Y}_i(t-(l-1)T_p)\dot{\Phi}_i^{-1}\dot{Y}_i^H(t-(l-1)T_p)\right\},$$

где $p\left(\dot{Y}(t)\right)$ – плотность вероятностей принимаемой реализации сигнала *i*-го передающего устройства; $\dot{\Phi}_i$ – корреляционная матрица сигнала *i*-го передающего устройства; $\dot{Y}_i(t)$ – комплексная амплитуда принимаемой реализация сигнала *i*-го передающего устройства.

В общем случае совместная плотность распределения вероятностей принимаемых сигналов при централизованной обработке с учетом независимости принимаемых сигналов на каждой приемной позиции будет иметь вид [5, 6]:

$$p\left(\dot{Y}(t)\right)=\prod_{k=1}^{M_{rec}}\prod_{i=1}^{M_{tr}}\prod_{l=1}^{L}\frac{1}{\pi^n\left|\det(\dot{\Phi}_i)\right|}\exp\left\{-\dot{Y}_i(t-(l-1)T_p)\dot{\Phi}_i^{-1}\dot{Y}_i^H(t-(l-1)T_p)\right\}.$$

Для определения структуры устройства обработки сигналов представим совокупность принимаемых реализаций на *k*-й приемной позиции в виде вектора:

$$\dot{Y}_k(t)=\{\dot{Y}_1(t)\dot{Y}_2(t)...\dot{Y}_{M_{tr}}(t)\}.$$

Логарифм отношения правдоподобия для *k*-й приемной позиции может быть представлен в виде:

$$\ln\Lambda_k=\int\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}\dot{Y}_k(t_1)\dot{\Phi}_k^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_k^H(t_2)dt_1dt_2-$$

$$-\frac{1}{2}\int\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}\dot{S}_k(t_1)\dot{\Phi}_k^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_k^H(t_2)dt_1dt_2,$$

где $\dot{\Phi}_k$ – корреляционная матрица шумов приемного устройства; $\dot{Y}_k(t)=\dot{S}_k(t)+\dot{n}(t)$ – вектор принимаемых реализаций сигнала на *k*-й приемной позиции; $\dot{S}_k(t)$ – вектор ожидаемых сигналов на *k*-й приемной позиции,

$$\dot{S}_k(t)=\{\dot{S}_1(t)\dot{S}_2(t)...\dot{S}_{M_{tr}}(t)\};$$

$\dot{n}_k(t)$ – вектор шумов приемного устройства; T – интервал наблюдения.

Вследствие того, что шумы многоканального приемного устройства некоррелированы, корреляционная матрица $\dot{\Phi}_k$ может быть представлена в виде [1, 2]:

$$\dot{\Phi}_k(t_1,t_2)=N_{ok}I\delta(t_1,t_2),$$

где N_{ok} – спектральная плотность мощности шума приемного устройства (полагаем, что шумы в каналах приемного устройства одинаковы); I – единичная диагональная матрица; $\delta(t_1,t_2)$ – дельта-функция.

С учетом этого, логарифм отношения правдоподобия обнаружителя на *k*-й приемной позиции может быть представлен в виде

$$\ln\Lambda_k = \sum_{i=1}^{M_{tr}}\sum_{j=1}^{M_{tr}}\sum_{l=1}^{L}\left[\int_0^{T_c}\int \dot{Y}_{ki}(t_1)\dot{\Phi}_k^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_{kj}^*(t_2)dt_1dt_2 - \right.$$

$$\left. -\frac{1}{2}\int_0^{T_c}\int \dot{Y}_{ki}(t_1)\dot{\Phi}_k^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_{kj}^*(t_2)dt_1dt_2\right] =$$

$$= \sum_{i=1}^{M_{tr}}\sum_{j=1}^{M_{tr}}\sum_{l=0}^{L-1}\left[\frac{1}{2\pi N_{ok}}\int_0^{T_c}\int \dot{Y}_{ki}(t_1)\dot{S}_{kj}^*(t_2)\delta(t_1,t_2)dt_1dt_2 - \right. \quad (2)$$

$$\left. -\frac{1}{2\pi N_{ok}}\int_0^{T_c}\int \dot{S}_{ki}(t_1)I\dot{S}_{kj}^*(t_2)\delta(t_1,t_2)dt_1dt_2\right] =$$

$$= \sum_{i=1}^{M_{tr}}\sum_{j=1}^{M_{tr}}\sum_{l=0}^{L-1}\left[\frac{1}{N_{ok}}\int_0^{T_c}\dot{Y}_{ki}(t)\dot{S}_{kj}^*(t)dt - \frac{1}{N_{ok}}\int_0^{T_c}\dot{S}_{ki}(t)\dot{S}_{kj}^*(t)dt\right].$$

Подставляя в (2) выражение для модели сигнала с бинарной фазовой модуляцией (1) получаем выражение, определяющее алгоритм обработки сигнала на *k*-й приемной позиции:

$$\ln\Lambda_k = \sum_{i=1}^{M_{tr}}\sum_{j=1}^{M_{tr}}\sum_{l=0}^{L-1}\left[\frac{\dot{\xi}_{ki}\sqrt{P_i}\alpha_{ki}}{N_{ok}}\int_0^{T_c} Y_{ki}(t_1)\dot{S}_{kj}^*(t)\exp\{-j\varphi_j\}\exp\{-j2\pi f_o(t-\tau_{ki} - \right.$$

$$\left. -lT_p)\}\exp\{-j2\pi F_{Dki}(t-\tau_{ki}-lT_p)\}dt - \frac{2P_{ki}\alpha_{ki}\alpha_{kj}}{N_{ok}}\int_0^{T_c} S_{ki}(t)S_{kj}^*(t)dt\right] =$$

$$= \sum_{i=1}^{M_{tr}}\sum_{j=1}^{M_{tr}}\sum_{l=0}^{L-1}\left[\frac{\dot{\xi}_{ki}\sqrt{P_i}\alpha_{ki}}{N_{ok}}\int_0^{T_c} Y_{ki}(t_1)\dot{S}_{kj}^*(t)\exp\{-j\varphi_j\}\exp\{-j2\pi f_o(t-\tau_{ki} - \right. \quad (3)$$

$$\left. -lT_p)\}\exp\{-j2\pi F_{Dki}(t-\tau_{ki}-lT_p)\}dt - \frac{2E_{c\,kij}}{N_{ok}}\right] =$$

$$= \sum_{i=1}^{M_{tr}}\sum_{j=1}^{M_{tr}}\sum_{l=0}^{L-1}\left[\frac{\dot{\xi}_{ki}\sqrt{P_i}\alpha_{ki}}{N_{ok}}\dot{\rho}_{kij}(\tau_{ki}-lT_p,F_{Dki}) - \frac{2E_{c\,kij}}{N_{ok}}\right],$$

где $\dot{\rho}_{kij}(\tau_{ki},F_{Dki})$ – корреляционный интеграл для *i*-го сигнала передатчика и *j*-го «ожидаемого» сигнала с учетом времени запаздывания и частоты Доплера сигнала; $E_{c\,kij}$ – энергия *i*-го сигнала на выходе *j*-го согласованного фильтра.

Выражение (3) определяет логарифм отношения правдоподобия для сигнала с полностью известными параметрами. Достаточная статистика будет состоять из суммы M_{tr} откликов согласованных фильтров при $i=j,(i,j=1...M_{tr})$ и $M_{tr}(M_{tr}-1)$ кросскорреляционных составляющих откликов ортогональных сигналов передающих позиций при $i\neq j,(i,j=1...M_{tr})$. Учитывая свойство ортогональности сигналов, принимаемых от различных передающих позиций ($\dot{\rho}_{kij}(\tau_{ki},F_{Dki})\cong 0$ при $i\neq j$), логарифм отношения правдоподобия будет иметь вид:

$$\ln\Lambda_k \cong \sum_{i=0}^{M_{tr}}\sum_{l=0}^{L-1}\left[\frac{\dot{\xi}_{ki}\sqrt{P_i}\alpha_{ki}}{N_{ok}}\dot{\rho}_{kij}(\tau_{ki}-lT_p,F_{Dki}) - \frac{2E_{c\,kij}}{N_{ok}}\right].$$

Структурная схема устройства приема и обработки ортогональных фазомодулированных сигналов на *k*-й приемной позиции MIMO системы обнаружения имеет вид, приведенный на рис. 1.

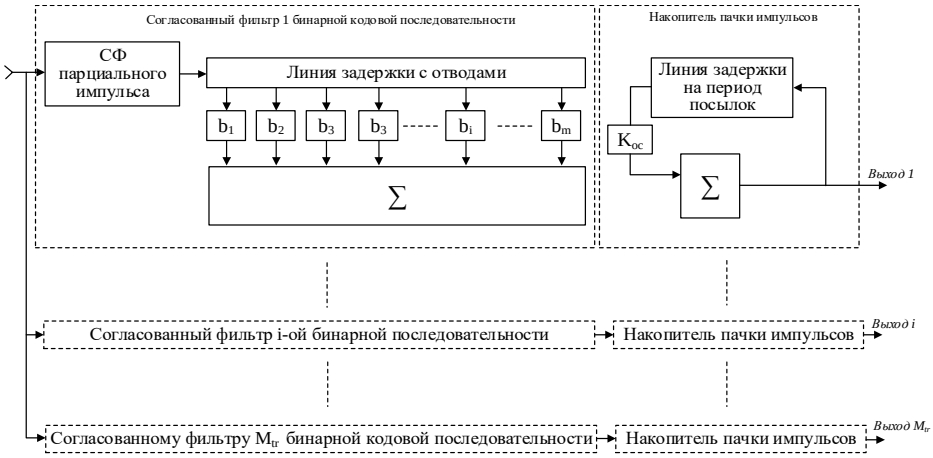


Рис. 1. Структурная схема алгоритма приема и обработки ортогональных фазомодулированных сигналов на приемной позиции MIMO системы обнаружения

Таким образом, на каждой приемной позиции осуществляется выравнивание задержек откликов с учетом времени запаздывания эхо-сигналов на трассе распространения «передающее устройство – цель – приемное устройство», многоканальная согласованная фильтрация каждого из M_{tr} возможных сигналов передающих позиций с учетом диапазона допплеровских частот сигнала с дальнейшим когерентным накоплением пачки импульсов в каждом канале.

Учитывая тот факт, что доплеровские частоты сигналов, приходящих от разных позиций, в общем случае в каждом приемном канале будут различаться, межканальное накопление сигнала должно осуществляться некогерентно. Для пространственно-когерентных систем сигналы, принимаемые на различных приемных позициях от одного и того же передатчика в общем случае, будут коррелированы. Степень корреляции будет зависеть от различий в доплеровских частотах сигналов на различных приемных позициях. Вследствие близкого расположения приемных позиций в пространственно-когерентных системах обнаружения, различия в доплеровских частотах сигналов будут незначительными, а принимаемые сигналы – коррелированы.

Для данного случая логарифм отношения правдоподобия для варианта централизованной обработки сигналов от различных приемных позиций может быть представлен в виде:

$$\ln\Lambda = \sum_{k=1}^{M_{rec}} \ln\Lambda_k = \sum_{k=1}^{M_{rec}} \int\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \dot{Y}_k(t_1)\dot{\Phi}_k^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_k^H(t_2)dt_1dt_2 -$$

$$-\frac{1}{2}\int\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \dot{S}_k(t_1)\dot{\Phi}_k^{-1}(t_1,t_2)\dot{S}_k^H(t_2)dt_1dt_2.$$

Учитывая полученные выше выражения для отношения правдоподобия применительно к обработке сигналов на приемных позициях, логарифм отношения правдоподобия для случая централизованной обработки в пространственно-когерентной системе будет иметь вид:

$$\ln\Lambda_k \cong \sum_{k=1}^{M_{rec}} \sum_{i=1}^{M_{tr}} \sum_{l=0}^{L-1} \left[\frac{\dot{\xi}_{ki}\sqrt{P_i}\alpha_{ki}}{N_{ok}} \dot{\rho}_{kii}(\tau_{ki} - lT_p, F_{Dki}) - \frac{2E_{cki}}{N_{ok}} \right].$$

С учетом этого результатом централизованной обработки сигналов с известными параметрами в пространственно-когерентной многопозиционной MIMO системе обнаружения будет сумма выходных сигналов внутрипозиционной обработки с учетом выравнивания межпозиционных задержек сигналов и их нормировки по уровню шума на различных приемных позициях.

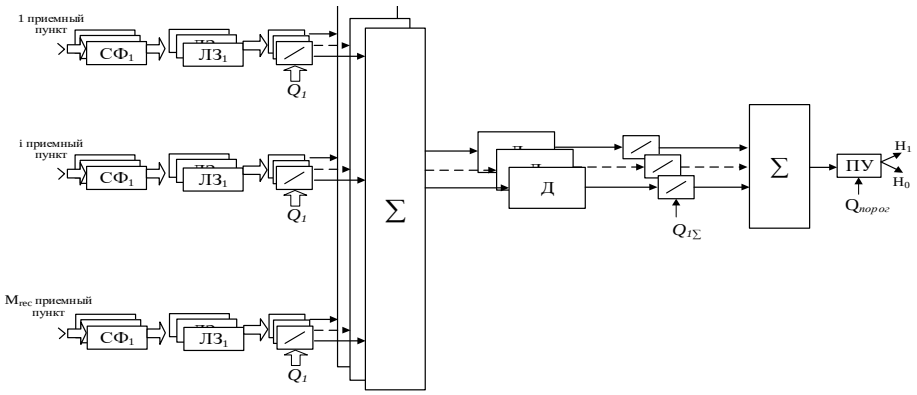


Рис. 2. Структурная схема алгоритма централизованной обработки ортогональных с прямым расширением спектра широкополосных сигналов

Структурная схема централизованной обработки сигналов в MIMO системе обнаружения для случая пространственно-когерентной системы и использовании ортогональных сигналов с бинарной фазовой модуляцией приведена на рис. 2, а соответствующий алгоритм на рис. 3.

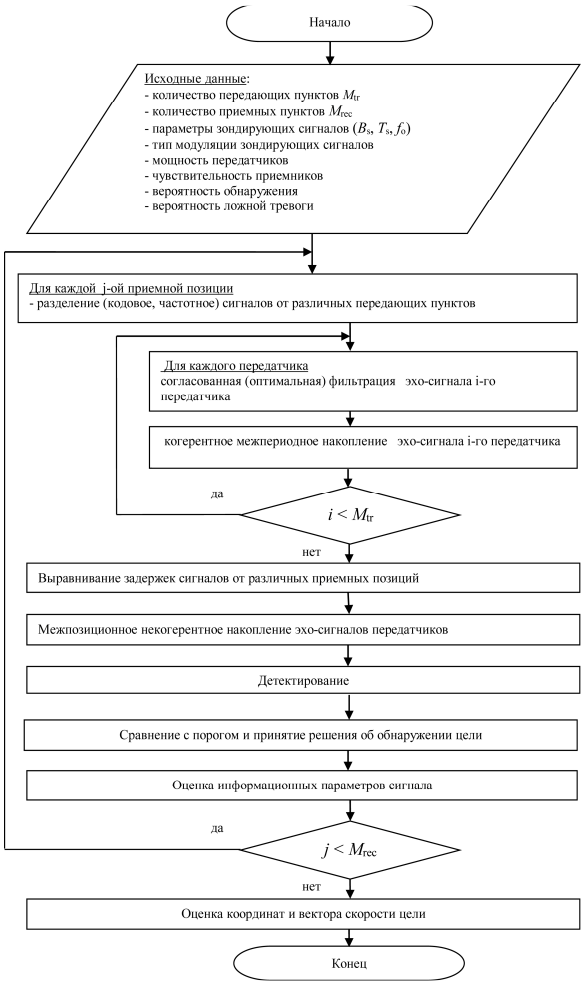


Рис. 3. Алгоритм обнаружения пространственнокогерентных сигналов

Таким образом, синтезированы варианты структурных схем, реализующих оптимальные алгоритмы обнаружения сигналов. Необходимо отметить, что MIMO РЛС, особенно обрабатывающие когерентные сигналы, значительно сложнее РЛС с ФАР. Это видно из приведенных выше структур оптимальной обработки. Поэтому техническая реализация MIMO РЛС требует применения современных средств цифровой обработки сигналов.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки энергетических характеристик различных типов перспективных MIMO РЛС.

Список литературы

1. Имнореев И.Я. Сверхширокополосные радары: Новые возможности, необычные проблемы, системные особенности. М.: Вестник МГТУ им. Баумана. Вып. 4. 1998. 356 с.

2. Акиншин Н.С., Хомяков А.В., Румянцев В.Л. Обработка сложных сигналов в условиях мешающих отражений для повышения помехозащищенности бортовых РЛС. Тула: ТулГУ. 2011. 257 с.

3. Computer Simulation of Aerial Radar Sattering, Recognition, Detection and Tracking. Editor Y.D. Shirman. Boston, London, Artech House, 2002.

4. Skolnik M., Hinde G., Meaks K. An advanced. Wideband Air Surveillance Radar. IEEE Trans. AES-34. № 4. 2001.

5. Чапурский В.В. Избранные вопросы теории сверхширокополосных систем. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. 289 с.

6. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Ширман Я.Д., Лосев Ю.И., Минервин Н.Н., Москвитин С.В., Горшков С.А., Леховицкий Д.И., Левченко Л.С. / Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. 828 с.

Петешов Андрей Викторович, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры, D-john_post@mail.ru, Россия, Череповец, Военный Ордена Жукова университет радиоэлектроники МО РФ,

Полубехин Александр Иванович, канд. техн. наук, преподаватель, D-john_post@mail.ru, Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,

Румянцев Владимир Львович, д-р техн. наук, профессор, заместитель начальника отдела, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тула, АО ЦКБА

ALGORITHM FOR DETECTING SPATIALLY COHERENT SIGNALS IN A SPACED MIMO RADAR SYSTEM

A.I. Polubekhin, A.V. Peteshov, V.L. Rumyantsev

Various options for processing echo signals in a spatially coherent MIMO system are considered. A model of the Probing signal in radar systems in the form of pulses modulated by binary or multiphase code sequences is presented. Generalized block diagrams of algorithms for centralized signal processing in a multi-position spatially coherent MIMO detection system for the case of independent fluctuations of echo signals are presented. The results can be used to evaluate the energy characteristics of various types of advanced MIMO radars.

Key words: radar system, spatial coherence, likelihood ratio.

Peteshov Andrey Viktorovich, candidate of technical sciences, professor, head of the department, D-john_post@mail.ru, Russia, Cherepovets, Military Order of Zhukov University of Radio Electronics of the Ministry of Defense of the Russian Federation,

Polubahin Alexander Ivanovich, candidate of technical sciences, professor, D-john_post@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow state technical University,

Rumyantsev Vladimir Lvovich, doctor of technical sciences, professor, deputy head of department, cdbae@cdbae.ru, Russia, Tula, JSC CDBAE

УДК 621.396

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛА СВЯЗИ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИЕМА СИГНАЛА

Ю.И. Мамон, С.А. Курбатский, Д.Б. Карандин, В.Л. Румянцев

Проведено описание флуктуаций коэффициента передачи ионосферного канала. Определены соотношения для вероятности ошибки в системе приема фазоманипулированного сигнала. Для сравнительной оценки помехоустойчивости различных систем связи часто рассмотрена двухлучевая модель канала связи. Приведены зависимости вероятности ошибки приема символа от отношения сигнал/шум.

Ключевые слова: канал связи, флуктуации сигнала, вероятность ошибки символа, помехи приема.

Для любого коротковолнового канала, имеющего в своем составе ионосферную линию связи, характерно большое количество самых разнообразных возмущений. Поскольку эти возмущения непосредственно связаны с процессом прохождения сигнала, то они появляются лишь при наличии сигнала в системе связи и носят названия мультипликативных помех. Кроме мультипликативных, в канале связи всегда присутствуют аддитивные помехи, порожденные собственными шумами канала это флуктуационные шумы атмосферы, станционные помехи и пр. Параметры аддитивной помехи входят во все выражения, описывающие помехоустойчивость средств связи будь то вероятность ошибки или какой-либо другой критерий.

Описанию замираний сигнала в канале связи посвящено значительное количество работ [1-4]. Однако, при оценке реальной помехоустойчивости систем связи необходимо иметь возможно более полные сведения как о параметрах линии связи, так и технических характеристиках приёмного и передающего устройства, источника и получателя сообщений. Поэтому определенный интерес представляет оценка влияния закона флуктуаций коэффициента передачи канала, метода обработки принимаемого сигнала на помехоустойчивость различных систем связи.

Флуктуации огибающей сигнала, если не принимать специальных мер, оказывают ощутимое влияние на его помехоустойчивость. Поэтому выяснению закона, которым могло аппроксимировать плотность вероятности этих флуктуации, уделяется самое пристальное внимание. В [5] предложена аналитическая модель замираний разного типа, полученная при следующих основных предпосылках:

1. Приходящие к приемному устройству лучи отражаются (или рассеиваются) в некотором объеме ионосферы таким образом, что разность хода соизмерима с длиной волны.

2. Число приходящих элементарных лучей, образовавшихся вследствие рассеяния на неоднородностях ионосферы настолько велико, что позволяет применить центральную предельную теорему.

3. Сигналы являются относительно узкополосными, вследствие чего времена распространения (t_{pi}) и коэффициенты передачи одинаковы для всех составляющих, то есть не зависят от номера луча [1, 2]. В результате передаваемый сигнал может быть представлен в виде:

$$Z(t) = \sum_{k=k_1}^{k_2} C_k \cos(k\omega_0 t + \varphi_k).$$

В результате для случая, когда разности времени распространения (Δf_i) достигают значений, существенно превышающих период средней частоты сигнала $2\pi/\omega_{ср}$, получено, что в этих условиях коэффициент передачи канала (μ) имеет распределение Релея. Если $\Delta f_i << 2\pi/\omega_{ср}$, то тогда коэффициент подчиняется обобщенному распределению Релея.

Влияние флюктуации коэффициента передачи канала на помехоустойчивость можно описать следующим образом. Так если для обеспечения вероятности ошибки 10^{-3} при передаче информации по каналу с постоянными параметрами требуется отношение сигнал/шум h_0^2 = 10 дБ, то при релеевском канале эта величина должна быть увеличена на 20 дБ. Влияние закона распределения флуктуации огибающей сигнала сравнительно меньше, однако уже при $K^2 = 5$ проигрыш релеевского канала по сравнению с обобщенным релеевским – составляет около 10 дБ. Таким образом, видно, что результат теоретической оценки помехоустойчивости приемного устройства зависит от того, как будут интерпретированы результаты экспериментов по определению плотности вероятности огибающей сигнала на входе приемника.

Флуктуации коэффициента передачи ионосферного канала по данным работ [6, 7] хорошо согласуется с распределениями Релея или Райса не более чем в 60…70 % случаев. В 20 % случаев отмечены флуктуации более глубокие нежели релеевские. Для линии связи, проходящей в основном через зону авроральных возмущений характерен, например, двугорбый вид закона распределения флуктуации [3], причем сигналы, пришедшие в точку приема под низкими углами к горизонту имеют более глубокие замирания, чем сигналы, пришедшие под более высокими углами. Все эти варианты обобщаются четырехпараметрическими распределениями амплитуд. Однако ввиду сложности выражения четырехпараметрического распределения его трудно использовать при анализе систем связи.

В работе [4] на основании обработки экспериментальных данных предлагается аппроксимировать распределение коэффициента передачи μ канала законом «преобразованный χ^2», а в [5, 6] распределением, включающим в себя «преобразованный χ^2» как частный случай при целых m [7]:

$$W(\mu) = \frac{2m^m \mu^{2m-1}}{\Gamma(m)\mu_0^{2m}} \cdot \exp\left(-\frac{m\mu^2}{\mu_0^2}\right), \quad \mu \geq 0, \tag{1}$$

где $m = \left(\overline{\mu^2}\right)^2 / \left(\overline{\mu^2 - \overline{\mu^2}}\right)^2 \geq \frac{1}{2}$.

При m = 1 выражение представляет собой закон распределения Релея, при m > 1 с большой точностью закон Райса. При (0,5 ≤ m < 2) выражение (1) описывает замирания более глубокие, чем релеевские. Таким образом при соответствующем подборе параметра m – закон распределения коэффициентов передачи большинства реальных каналов, может быть представлен единым выражением в виде (1), что представляет известные удобства, например, при моделировании системы связи.

В [3, 5] приводится выражение для средней вероятности ошибки приёма сигналов по методу сравнения фаз:

$$P_{ср} = \int_0^\infty \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\mu^2 h_0^2}{2\mu_0^2}\right) \cdot W(\mu) d\mu = \tag{2}$$

$$= \frac{1}{2}\left(\frac{2m \cdot m_0}{\overline{h_0^2}}\right)^{\frac{m+m_0+1}{2}} \exp\left(\frac{m \cdot m_0}{\overline{h_0^2}}\right) \cdot W_{\frac{1-m-m_0}{2}, \frac{m-m_0}{2}}\left(\frac{2m \cdot m_0}{\overline{h_0^2}}\right),$$

где h_0^2 – средний квадрат отношения сигнал/шум; $W_{i,j}(z)$ – функция Уиттекера.

Соотношение (2) может быть преобразовано к виду:

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{2}\left(\frac{2\cdot m_0}{h_0^2}\right)^{m_0} \exp\left(\frac{2\cdot m_0}{h_0^2}\right)\cdot\gamma\left(1-m_0,\frac{2m_0}{h_0^2}\right), \qquad (3)$$

где $\gamma(\alpha, \chi)$ – неполная гамма функция.

Из (3) следует, что средняя вероятность ошибки существенно возрастает при изменении параметра m_0, то есть при увеличении глубины медленных замираний. При $m_0 > 4$ средняя вероятность ошибки в канале с медленными и быстрыми замираниями практически не отличается от ее значения в канале только с быстрыми замираниями $m_0 = \infty$.

В [3] при выводе выражения для вероятности ошибки в системе приема фазоманипулированного сигнала (ОФТ) при квазирелеевских замираниях и приеме по методу сравнения фаз, для коэффициента корреляции использовано приближенное выражение:

$$R(\tau) = \exp\left(\frac{\tau^2}{2\beta^2}\right),$$

где β^2 – при ионосферной связи на длинных трассах принимает значение 0,1 сек, на коротких трассах 2 сек.

Вероятность ошибки при этом равна:

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{2}\cdot\frac{1+K^2+h_0^2(1-R)}{1+K^2+h_0^2}\exp\left(-\frac{K^2\cdot h_0^2}{1+K^2+h_0^2}\right).$$

Здесь $K^2 = \mu_{\text{р}}^2/\mu_{\text{ф}}^2$, $\mu_{\text{ф}}^2 = \mu_0^2 - \mu_{\text{р}}^2$ – среднее значение квадрата флюктуирующей части коэффициента передачи, а $\mu_{\text{р}}^2$ – его регулярная составляющая. Эта зависимость при различных значениях R и K приведена на рис. 1.

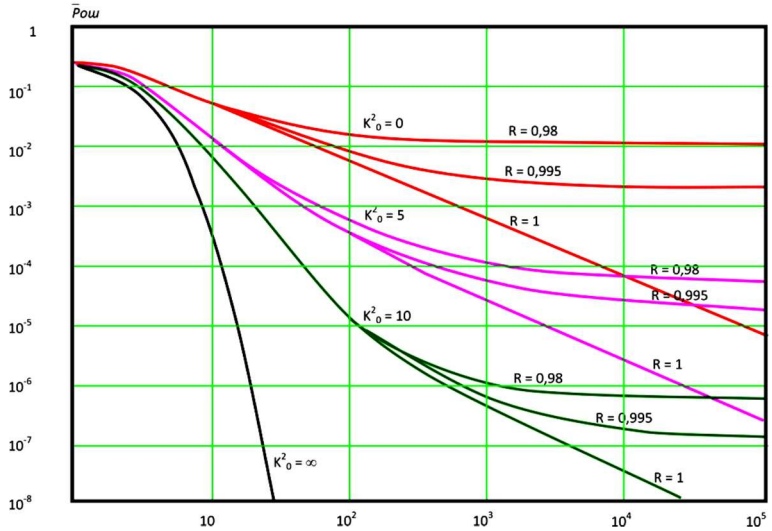


Рис. 1. Зависимость вероятности ошибки приема символа при различных значениях R и K

При $K = 0$ получаем

$$P_{\text{ОФТ}} = \frac{1}{2}\cdot\frac{1+h_0^2(1-R)}{1+h_0^2}.$$

Особенностью относительных методов манипуляции при $R < 1$ является то, что вероятность ошибки не равна нулю, даже при сколь угодно большой мощности сигнала. Это объясняется тем, что в системах ОФТ ошибка является результатом флуктуации разности фаз между двумя соседними посылками, происходящей как в результате сложения сигнала с шумом, так и в результате изменения начальной фазы самого приходящего сигнала. Даже при отсутствии влияния помехи h_0^2 вторая причина может вызвать ошибку, если $R \neq 1$.

На практике при моделировании процессов функционирования систем связи для сравнительной оценки помехоустойчивости различных систем связи часто используется двухлучевая модель [5-7].

При таком подходе считается [4-6], что время запаздывания второго луча $\Delta\tau_{зап}$ кратно длительности элементарной посылки сигнала τ_0, в связи с чем при переходе с одного луча на другой фаза стробирующих импульсов остается прежней, что эквивалентно наличию в системе идеальной тактовой синхронизации. При релеевском характере замираний обоих лучей получена нижняя граница помехоустойчивости для случая некогерентного приема ОФТ:

$$\overline{P}_{ош} = \frac{1}{4(\rho_1 + \rho_2 + 1)}\left[1 + \sqrt{\frac{4\rho_1\rho_2 + \rho_1 + \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}}\right],$$

где $\rho_1 = \sigma_{01}^2 / \sigma_n^2$, $\rho_2 = \sigma_{02}^2 / \sigma_n^2$ – отношение мощностей рассеянных составляющих сигналов первого и второго луча к мощности помех.

Если ввести обозначение $\rho_1 / \rho_2 = m$ и $\rho_1 = h_0^2$, то выражение примет вид:

$$P_{ош} = \frac{1}{4(h_0^2 + h_0^2 m + 1)}\left[1 + \sqrt{1 + \frac{4h_0^2 m}{m+1}}\right].$$

Из рис. 2 видно, что если не применяется никаких мер для борьбы с мешающим лучом (m = 0,5…1), то проигрыш в помехоустойчивости по сравнению с однолучевым распространением уже на уровне $P_{ош} = 10^{-3}$ составляет 30 дБ. Влияние второго луча даже при m = 0,05 говорит о том, что для борьбы с явлением межсимвольной интерференции на приемной стороне требуются антенны с очень высокими КНД, что значительно повышает стоимость системы связи.

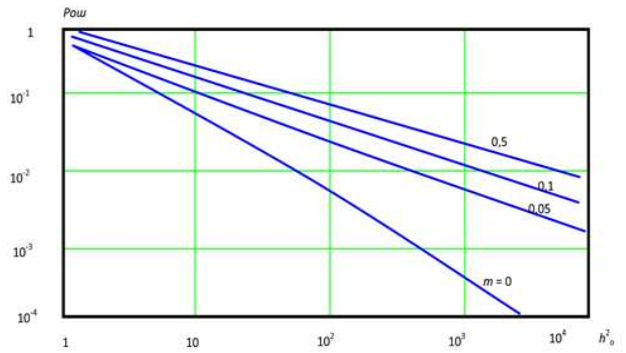


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибки приема символа от отношения сигнал/шум двухлучевой модели

Замирания в однолучевом канале таковы, что соотношения между амплитудами и фазами составляющих сигнала не изменяется, а скорость замираний оказывается меньше, чем в многолучевом канале [1, 3, 4]. Широкополосные системы связи позволяют существенно повысить помехоустойчивость за счет сложения энергий всех или наиболее интенсивных выделенных лучей.

Следует отметить, что такой метод обработки принимаемого сигнала также как и прием на разнесенные антенны не влечет за собой потери ни мощности сигнала, ни реальной пропускной способности системы. При разнесении по времени длительность элемента уменьшается в Θ раз. Поэтому среднее отношение энергии сигнала к спектральной плотности помехи $h_\theta^2 = h_0^2 / \Theta$. Здесь h_0^2 – среднее отношение энергии сигнала к спектральной плотности помехи, которое имело бы место, если бы тоже передающее устройство использовалось в канале без разнесения.

Во многих случаях можно отказаться от строгой линейности режима передатчика, либо иметь некоторый запас пиковой мощности, позволяющий на короткие отрезки времени допускать перемодуляцию передатчика. Например, при достаточно большом $\Theta \geq 8\ldots9$, для вероятности ограничения $3\cdot10^{-3}$ $h_\theta^2 = h_0^2 / 4{,}5\Theta$ [6].

Для наибольшей общности обычно полагают, что $h_\theta^2 = h_0^2 / \Theta^\lambda$, где показатель λ может принимать различные значения от 0 до 2.

В связи с этим при полностью коррелированных замираниях (R = 1) в ветвях частотного разнесения, никакого выигрыша в помехоустойчивости по сравнению с одиночным приемом получено не будет даже при использовании оптимального когерентного сложения с весовым коэффициентом [3]. При этом вероятность ошибки будет иметь вид

$$\overline{P}_{\text{ош}} = \frac{1}{2}\left[1 - \sqrt{\frac{h_\theta^2}{h_\theta^2 + 1}}\left(1 + \sum_{k=1}^{\theta-1} \frac{(2k-1)!}{k!\left(h_\theta^2 + 2\right)^2}\right)\right].$$

При допустимой вероятности ошибки 10^{-3} сдвоенный прием при когерентном сложении и некоррелированных коэффициентах передачи обеспечивает энергетический выигрыш до 20 дБ. В случае полной корреляции между коэффициентами передачи в ветвях сдвоенного приёма энергетический выигрыш до 3 дБ получается лишь при $h_\theta = h_0$ ($\lambda = 0$ – приём на сдвоенные антенны).

В связи с этим следует отметить, что при наличии корреляции замираний сигналов увеличение числа ветвей разнесения с пропорциональным перераспределением излучаемой мощности в определенных условиях может привести даже к ухудшению помехоустойчивости приема [4, 5]. Так при релеевских замираниях сигнала вероятность ошибки с учетом корреляции сигналов в ветвях разнесения описывается соотношением [2, 5]:

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{2\prod_{i=1}^{\theta}\left(1 + \alpha_{0i} h_\theta^2\right)}, \qquad (4)$$

где $h_\theta^2 = h_0^2 / \Theta$; α_{0i} – нормированные собственные значения корреляционной матрицы в ветвях.

По выражению (4) была рассчитана зависимость h_0^2 от числа ветвей разнесения Θ для корреляционной матрицы при фиксированных значениях коэффициента корреляции между гауссовыми составляющими R_{1n}. Вычисления проводились при гауссовой аппроксимации зависимости элементов корреляционной матрицы:

$$R_{i,j} = \exp\left(-\frac{(i-j)^2 r^2}{(n-1)^2 r_0^2}\right),$$

где r_0 – выбирается из условия $R(r_0) = 1/e$.

Полученные результаты для вероятности ошибки $P_{\text{ош}} = 10^{-5}$ представлены на рис. 3.

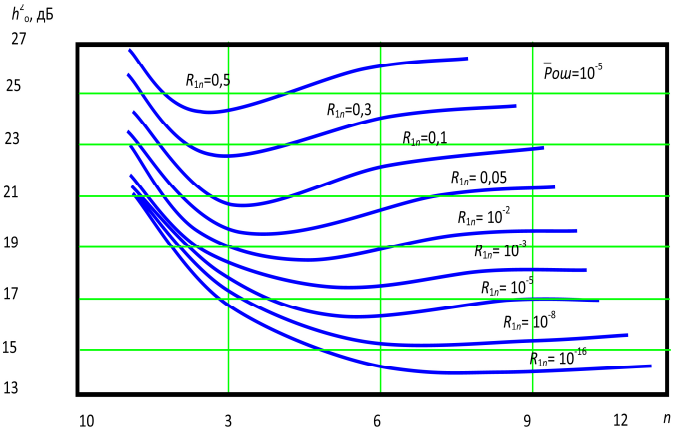


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибки от числа ветвей разнесения

Из рис. 3 видно, что для заданной достоверности приема при конкретной гауссовой корреляционной матрице требуется некоторое оптимальное значение числа ветвей разнесения $\Theta_{опт}$, обеспечивающее минимальное значение h_0^2.

На рис. 4 приведены результаты расчета оптимального числа ветвей разнесения n в зависимости от R_{1n}, необходимых для обеспечения вероятностей ошибок $P_{ош} = 10^{-3}$, 10^{-4}, 10^{-5}.

Следует отметить, что повышение h_0^2 при $\Theta > \Theta_{опт}$ не столь велико, чтобы иметь определяющее значение при выборе числа ветвей разнесения. Также существенные является уменьшение эффективности разнесённого приема при увеличении Θ по мере стремления $\Theta \rightarrow \Theta_{опт}$.

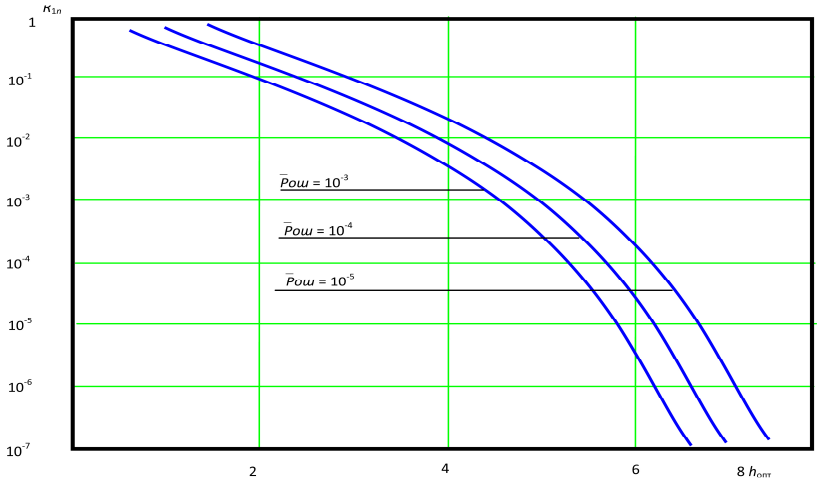


Рис. 4. Зависимость коэффициента корреляции от количества ветвей разнесения при различной вероятности ошибки приема символа

В зависимости от относительной стоимости каждой ветви разнесения и энергетического потенциала радиолинии следует ограничиваться рациональным числом ветвей $\Theta_р > \Theta_{опт}$, при котором дальнейшее увеличение Θ не окупается.

Подводя итог вышеизложенному можно сделать вывод о том, что параметры канала связи оказывают существенное воздействие на помехоустойчивость всей системы.

При этом вероятность ошибки изменяется в зависимости от закона флуктуации огибающей сигнала на входе приёмника сигнала в подканалах (при разнесенном приёме), времени запаздывания лучей и прочее. Кроме указанных факторов, влияние на помехоустойчивость конечно оказывают: вид модуляции сигнала, способ

детектирования и комбинирования его, вид и уровень помехи в канале и многие другие факторы, не связанные (кроме уровня станционных помех) с процессом распространения радиоволн.

Отождествление КВ каналов передачи информации и, соответственно, оптимальный (по критерию помехоустойчивости) выбор рабочей частоты достаточно уверенно может быть осуществлен на основе зондирования ионосферы.

Список литературы

1. Головин О.В. Декаметровая радиосвязь. М.: Радио и связь, 1990. 341 с.

2. Головин О.В. Имитационное моделирование системы ДКМ радиосвязи с вынесенным ретрансляционным пунктом. Электросвязь. 1989. № 7. С. 48-51.

3. Phil Wilkinson. Looped Demonstrations on Global Dynamics of the Ionosphere and Optimum Regimes for Ionospheric Communications. Radoscientist. The magazin of URSI. Vol. 4. № 4. December, 1993. 110 p.

4. Райзер М. Оценка характеристик систем передачи данных. ТИИЭР. Т. 70. № 2. 1982. 28 с.

5. Данилкин И.П., Денисенко П.Ф., Соцкий В.В. Исследования по геомагнетизму, аэронавтике и физике Солнца. Иркутск: Наука, 1975. Вып. 33. 102 с.

6. Тузов Г.И., Сивов В.А., Прытков В.И. и др. Помехозащищённость радиосистем со сложными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 297 с.

7. Бахметьева Н.В., Бенедиктов Е.А., Игнатьев Ю.А. Статистические характеристики амплитуды КС. Радиотехника. 1985. № 3. С. 84-88.

Мамон Юрий Иванович, д-р техн. наук, доцент, главный специалист, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тула, АО ЦКБА,

Курбатский Сергей Алексеевич, начальник отделения, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тула, АО ЦКБА,

Карандин Денис Борисович, начальник кафедры, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тюмень, Тюменское высшее военно-инженерное командное училище имени маршала инженерных войск А.И. Прошлякова МО РФ,

Румянцев Владимир Львович, д-р техн. наук, профессор, заместитель начальника отдела, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тула, АО ЦКБА

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF COMMUNICATION CHANNEL PARAMETERS ON THE NOISE IMMUNITY OF SIGNAL RECEPTION

Yu.I. Mamon, S.A. Kurbatsky, D.B. Karandin, V.L. Rumyantsev

The description of fluctuations in the transmission coefficient of the ionospheric channel is Carried out. The relations for the error probability in the phase-manipulated signal reception system are determined. For a comparative assessment of the noise immunity of various communication systems, a two-beam model of the communication channel is often considered. The dependences of the probability of a symbol reception error on the signal-to-noise ratio are given.

Key words: communication channel, the signal fluctuations, the probability of symbol error, the noise of the reception.

Mamon Yuri Ivanovich, doctor of engineering sciences, associate Professor, chief specialist, cdbae@cdbae.ru, Russia, Tula, JSC CDBAE,

Kurbatskiy Sergey Alexeyevich, lead of department, cdbae@cdbae.ru, Russia, Tula, JSC CDBAE,

Karandin Denis Borisovich, head of the department, cdbae@cdbae.ru, Russia, Tyumen, Tyumen VVAI,

Rumyantsev Vladimir Lvovich, doctor of technical sciences, professor, head of department, cdbae@cdbae.ru, Russia, Tula, JSC CDBAE

УДК 371.693

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ВИЗУАЛЬНУЮ ОБСТАНОВКУ ДЛЯ ОПЕРАТОРА ПТРК

Н.С. Акиншин, А.И. Ковинько, А.Е. Романюта, И.А. Ростовцев

На основе анализа экспериментального материала создана модель, для различных состояний оптической погоды, каждая из которых характеризуется ансамблем входных параметров, при определенном профиле спектральной зависимости объемных коэффициентов аэрозольного ослабления. Дана оценка видимости цели оператором ПТРК с тепловизионной системой наведения при наличии кратковременных аэрозольных помех.

Ключевые слова: аэрозольные помехи, тренажерная система, оптическое излучение.

Наличие оптического канала наведения в системе управления делает ПТРК весьма чувствительным к воздействию аэрозольных помех, возникающих при боевом применении комплексов. Воздействие подобных помех связано с ухудшением видимости цели оператором, что приводит к снижению вероятности поражения цели с первого пуска и живучести ПТРК на поле боя. Аэрозольные помехи могут быть естественного (туман, дождь, облачность) и искусственного (пыледымовые облака от движения техники, специальные дымовые средства, разрывы снарядов) происхождения. Эти соображения делают задачу обучения операторов работе в сложной оптической обстановке одной из главных задач профессиональной подготовки в целом. Учитывая особенности функционирования различных анализаторов человека, специалисты стремятся к тому, чтобы такой тренажер позволил создать наиболее полную и точную копию информационной модели работы комплекса в реальном масштабе времени в виртуальной среде, максимально приближенной к реальной.

Современная тренажерная система представляет собой сложнейшее техническое устройство, содержащее в своем составе модели (имитаторы) отдельных систем. Поскольку основные операции при работе ПТРК выполняются визуально, остановимся более подробно на имитаторе визуальной обстановки, который представляет обучаемому информацию о состоянии окружающей среды и положении обучаемого в данной среде.

Для многих задач обучения (особенно связанных с адекватностью зрительного восприятия информационной величины) необходимо учитывать закономерности восприятия, которые изменяются в зависимости от угла зрения, дальности видимости и состояния окружающей среды, т. е. наличия монотонных (типа тумана) и немонотонных (типа рваной облачности, задымленности, пылевых облаков и т. п.) аэрозольных помех.

Поэтому целью работы является синтез математической модели влияния аэрозольных помех, которая учитывает влияние.

Спектр пропускания атмосферы весьма неоднороден - наряду с обширными областями очень интенсивных полос поглощения атмосферных газов имеются и так называемые окна прозрачности, в диапазонах длин волн которых обычно выбирается середина рабочего участка для той или иной оптико-электронной системы и где подчас решающее значение в ослаблении оптического излучения играет атмосферный аэрозоль.

В качестве основной количественной характеристики ослабления параллельного потока радиации в аэрозольной атмосфере следует рассматривать входящий в выражение Бугера [1] объемный показатель аэрозольного ослабления:

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_n,$$

равный сумме объемных показателей рассеяния α_p и поглощения α_n.

В задачах расчета переноса излучения через замутненные диспергированным веществом среды используются положения теории Ми, изложенные в монографиях [2, 3] и в виде руководства для инженерных положений [4].

Согласно теории Ми:

$$\alpha_{p,n} = N\sum_0^\infty K_{p,n}(n,\lambda)\, f(r)dr,$$

где $K_{p,n}$ – соответственно показатели ослабления, рассеяния и поглощения i-ой частицы среды; N – общее количество частиц; $f(r)$ – функция распределения частиц аэрозоля по размерам, удовлетворяющим условию:

$$\int f(r)dr = 1.$$

При расчетах удобно рассматривать отношения показателей $K_{p,n}$ к геометрическому сечению частицы πr^2, а именно величины:

$$K = \frac{K}{\pi r^2};\quad K_p = \frac{K_p}{\pi r^2};\quad K_n = \frac{K_n}{\pi r^2},$$

которые, следуя терминологии [1] называются, соответственно, факторами эффективного ослабления рассеяния и поглощения, и являются достаточно сложными функциями так называемого относительного размера частиц:

$$\rho = \frac{2\pi r}{\lambda},$$

где r – радиус частицы; λ – длина волны излучения и показателя преломления вещества частицы $m = n - ix$.

Значения функции $K_{m,n}(p,m)$ рассчитаны и затабулированы, как в монографиях [2, 3], так и в других изданиях для случаев сферических частиц, эллипсов и ряда других форм, К настоящему времени разработано несколько моделей, которые позволяют описать спектральный ход оптической толщи атмосферы в окнах прозрачности [6]. Однако общим недостатком, присущим этим моделям, следует считать их статичность. Они отражают некоторые «средние» условия и не учитывают реальные флуктуации оптической плотности аэрозольной атмосферы, связанные с изменчивостью синоптических процессов.

Модель оптического состояния приземного слоя воздуха [6, 7] основана на синтезе результатов обобщения натурных экспериментов, выполненных в разнообразных погодных условиях и свободна в значительной мере от указанного выше недостатка, т.к. позволяет описывать реальные изменения пропускания атмосферы, причем в форме, наиболее отвечающей требованиям разработчиков оптико-электронных систем.

При построении аэрозольного блока модели основной упор сделан на определение оптимального ансамбля критериев для идентификации оптического состояния аэрозоля. Основными характеристиками ансамбля входных параметров аэрозольного блока является метеорологическая дальность видимости (МДВ) – S_M, относительная влажность f и температура воздуха t.

В результате комплексного подхода при анализе экспериментального материала создана модель, охватывающая различные состояния оптической погоды, каждая из которых характеризуется ансамблем входных параметров, а главное – определенным профилем спектральной зависимости объемных коэффициентов аэрозольного ослабления *a*.

Для аналитического описания *a* в рамках выделенного состояния атмосферы используется соотношение:

$$\alpha_\lambda = \alpha_{0,55}\left[n_0 + n_1 \cdot \lambda^{-n_2}\right],$$

где n_0, n_1, n_2 – эмпирические коэффициенты; $\alpha_{0,55}$ – коэффициент ослабления на λ – 0,55 мкм (S_M = 3,91 / $\alpha_{0,55}$). Некоторые значения n_0, n_1, n_2 для характерных состояний оптической погоды с соответствующими градациями приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характерные состояния оптической погоды с соответствующими градациями

№ п/п	Тип оптической погоды	Синоптическая ситуация	Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %	МДВ	n_0	n_1	n_2
1	Дымка	антициклон, северо-восточная европейская область	от –20 до 20	0-90	10-50	0,03	0,35	2
2	Туманная дымка		от –12 до 25	90-100	5-10	0,22	0,57	0,65
3	Дымка	та же	от –12 до 25	60-90	5-15	0,3	0,37	0,9
4	Ледяной туман	тепловые сектора циклонов субтропических широт	от –35 до –12	70-90	1-5	0,56	0,39	0,39
5	Мгла	квазистационарные антициклоны	> 0	< 40	–	0	1	0

Не менее важным для расчета переноса радиации в атмосфере является фактор ослабления, связанный с континуальным поглощением излучения. Соответствующая проблема находится в центре внимания исследователей и обсуждается интенсивно уже продолжительное время в связи с определенными расхождениями и неоднозначной интерпретацией имеющихся экспериментальных данных.

В данной работе приняты результаты исследований [1], которые позволили получить статистически обеспеченные коэффициенты континуального поглощения, в аналитическом виде следующие выражения вида:

$$K = K_1 P_Э + K_2 e,$$

где *K* – суммарный коэффициент поглощения; $P_Э$ – эффективное давление; *e* – парциальное давление паров воды, атм. В табл. 2 приведены спектральные значения коэффициентов K_1 и K_2.

Таблица 2

Спектральные значения коэффициентов K1 и K2

λ, мкм	1,06	1,63	3,97	8,63	10,1	12,01
K_1, см$^{-1}$×атм$^{-1}$	1,01	0,02	0,03	0,06-0,09	0,08-0,11	0,11
K_2, см$^{-1}$×атм$^{-1}$	0	0	0	0-3	0-3	7

В общем виде оптическая толщина в окнах прозрачности атмосферы за счет аэрозольного ослабления и континуального поглощения излучения парами воды определяется выражением

$$\alpha_\lambda D = \left[\alpha_{0,55}\left(n_0 + n_1\lambda^{-n_2}\right) + K_1 P_Э + K_2 e\frac{21{,}67e}{273+t}\right]D,$$

где *D* – протяженность оптической трассы.

Суммарная погрешность оценки оптической толщины трасс визирования по предлагаемой модели оценивается в 15…20 %.

Приведенные соотношения далеко не исчерпывают всех задач оценки помехоустойчивости тепловизионных приборов. Это может стать предметом самостоятельной задачи, тем не менее, полученные данные позволяют иметь представление о качественном показателе влияния некоторых параметров атмосферы на работу тепловизионных приборов и в первую очередь прицелов противотанковых комплексов.

Список литературы

1. Применение дымов в бою и операции / под ред. Пичкалова В.К. М: Воениздат, 1975.

2. Иванов В.П. Прикладная оптика атмосферы в тепловидении. Казань: «Новое издание», 2000.

3. Филиппов В.Л., Макаров А.С., Иванов В.П. Оптическая погода в нижней тропосфере (электрический метод расчета ослабления ИК излучения). Казань: Дом печати, 1998. 172 с.

4. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. 414 с.

5. Филиппов В.Л., Макаров А.С. Ослабление ИК излучения в атмосфере при наличии осадков // Оптический журнал. 1996. № 11. С. 33-36.

6. Филиппов В.Л., Мирумянц С.О. Инженерная методика расчета спектральной прозрачности атмосферы в области длин волн 0,9-6,3 мкм // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1969. Т. 5. № 6.

7. Филиппов В.Л. Спектральное молекулярное излучение горизонтальных трасс приземной атмосферы (экспериментальные данные) // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1979. Т. 15. № 1.

8. Алексеев О.А. Математическая модель спектральной плотности силы излучения факелов, образующихся при стационарном режиме горения топлива // Оптический журнал. 1998. Т. 65. № 1.

9. Алексеев О.А., Шамсутдинов М.Э. Аппаратура и методика определения спектральных параметров пульсирующих источников излучения // Оптический журнал. 1998. Т. 65. № 1.

Акиншин Николай Степанович, д-р техн. наук, профессор, начальник отдела, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тула, АО ЦКБА,

Ковинько Андрей Иванович, заместитель начальника отдела, cdbae@cdbae.ru, Россия, Москва, Главное управление вооружения МО РФ,

Романюта Александр Евгеньевич, начальник, cdbae@cdbae.ru, Россия, Москва, НИИЦ ФГБУ «46 ЦНИИ» МО РФ,

Ростовцев Иван Александрович, преподаватель, niri-opaii@mail.ru, Россия, Пенза, Военная академия материально-технического обеспечения (филиал)

MODEL FOR ASSESSING THE IMPACT OF ATMOSPHERIC AEROSOL FORMATIONS ON THE VISUAL ENVIRONMENT FOR AN ATGM OPERATOR

N.S. Akinshin, A.I. Kovinko, A.E. Romanyuta, I.A. Rostovtsev

Based on the analysis of the experimental material, a model was created for various States of optical weather, each of which is characterized by an ensemble of input parameters, with a certain profile of the spectral dependence of the volume coefficients of aerosol attenuation. The visibility of the target is estimated by the operator of an ATGM with a thermal imaging guidance system in the presence of short-term aerosol interference.

Key words: aerosol interference, training system, optical radiation.

Akinshin Nikolay Stepanovich, doctor of technical sciences, professor, head of department, cdbae@cdbae.ru, Russia, Tula, JSC CDBAE,

Kovinko Andrey Ivanovich, deputy head of department, cdbae@cdbae.ru, Russia, Moscow, The main weapons of defense,

Romanyuta Aleksandr Evgenievich, head, cdbae@cdbae.ru, Russia, Moscow, FGBI «46 CSRI»,

Rostovtsev Ivan Aleksandrovich, teacher, niri-opaii@mail.ru, Russia, Penza, Penza Military Academy of logistics (branch)

УДК 623.419

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОМПЛЕКСОВ РВ В АО «КБП»

А.В. Игнатов, А.Г. Кондратьев, Я.С. Пятницкий, Э.С. Исаева

Статья посвящена использованию методов системного подхода при разработке комплексов ракетного вооружения в АО «КБП». Рассмотрены основные образцы противотанковых ракетных комплексов, разработанных на предприятии. Приведены принципы формирования перспективных систем данных комплексов.

Ключевые слова: ракетное вооружение, противотанковые ракетные комплексы, высокоточное оружие, системный подход.

Одним из ведущих приоритетов деятельности АО «Конструкторского бюро приборостроения им. академика А.Г. Шипунова» (АО «КБП») является разработка и производство в интересах Вооруженных Сил Российской Федерации современных высокоточных комплексов вооружения, в т.ч. образцов ракетного вооружения (РВ).

В АО «КБП» академиком А.Г. Шипуновым сформирована научно-конструкторская школа системного проектирования наукоемких многофункциональных комплексов высокоточного оружия (ВТО), которая руководствуется следующими базовыми принципами:

– использование методов и средств, позволяющих исследовать свойства, структуру и функции комплексов вооружения (КВ) в целом, представив его в качестве систем со всеми сложными межэлементными взаимосвязями, взаимовлиянием элементов на систему и на окружающею среду;

– формирование облика перспективного вооружения путем постоянного изучения тенденций развития основных систем ВТО зарубежных стран, исследований и военно-экономической оценки достижений науки и техники, анализа опыта применения комплексов ВТО в локальных войнах и вооруженных конфликтах;

– необходимость разработки комплексов ВТО многоцелевого назначения и возможность унификации отдельных подсистем комплексов ВТО.

Следование системным принципам является определяющим условием как при выработке направлений развития ВТО, так и в процессе выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Практическим примером системного подхода является система противотанковых ракетных комплексов (ПТРК), разработанных на предприятии и являющихся одним из основных средств РВ, обеспечивающих высокую эффективность как наступательных, так и оборонительных операций, которые применяются в носимом и возимо-переносном вариантах, на подвижных носителях – колесных машинах, БМП, БТР, а также танках, вертолетах и самолетах.

Главными преимуществами этих комплексов являются:

высокая вероятность поражения цели с первого выстрела в любое время суток;

высокое могущество боевых частей;

относительно малые масса и размеры, обеспечивающие достаточную скрытность и мобильность на поле боя.

Разработка и производство противотанковых ракетных комплексов в мире ведется уже более полувека. За это время, благодаря простоте в эксплуатации и относительно невысокой стоимости, ПТРК стали наиболее массовым и востребованным видом ВТО.

При этом сам термин «ПТРК» давно не отражает всех тех задач, решение которых в настоящее время отводится этому виду оружия.

Созданные первоначально как специализированные средства борьбы с танками, сегодня превратились в оборонительно-штурмовое оружие, которое эффективно используется для поражения целого спектра других малоразмерных целей: легкобронированной и небронированной техники, разного рода фортификационных сооружений, живой силе, элементов инфраструктуры, а также малоразмерных воздушных целей (вертолетов, беспилотных летательных аппаратов и атакующих самолетов штурмовой авиации).

Основными разработками АО «КБП» в этой области являются системы ПТРК второго («Фагот», «Конкурс», «Метис») и третьего поколения («Метис-М1», «Корнет») (рис. 1).



Рис. 1. Основные разработки ПТРК в АО «КБП»

Противотанковые комплексы первого поколения при всех своих достоинствах имели и недостатки. Одним и наиболее главным является ручное наведение, что ставит эффективность оружия в зависимость от квалификации и психофизического состояния оператора. Поэтому технический задел проектирования и опыт эксплуатации ПТРК первого поколения позволил более рационально использовать имеющие возможности при создании ПТРК второго поколения. Так в сентябре 1970 года был принят на вооружение первый легкий отечественный переносной противотанковый комплекс 9К111 («Фагот») с ракетой 9М111 (рис. 2).

Комплекс «Фагот» является противотанковым средством батальонного звена, поэтому его характеристики выбраны с учетом особенностей борьбы с танками именно в этом боевом подразделении: в основе всех решений лежит стремление обеспечить при достаточной дальности стрельбы (до 2000 м) высокую маневренность комплекса,

включая в это понятие удобство его переноски небольшим боевым расчетом (до 2 – 3 человек), а также свободу выбора направления стрельбы на любой стадии боя. Использование в комплексах второго поколения полуавтоматической системы управления позволило снизить требования по отбору операторов и существенно сократить время на их подготовку. Для наработки у операторов навыков стрельбы был разработан тренажер.



Рис. 2. Противотанковый ракетный комплекс «Фагот» (9К111)

В 1974 году был принят на вооружение Советской Армии возимо-выносной противотанковый ракетный комплекс «Конкурс» (рис. 3) с полуавтоматической системой управления, обеспечивающий поражение на дальностях до 4 000 м бронированных целей, укрепленных огневых точек, подвижных и неподвижных малоразмерных наземных и находящихся на плаву целей. Он был создан с использованием технических решений, реализованных в комплексе «Фагот», что обеспечило боевую унификацию комплексов.



Рис. 3. Самоходный противотанковый ракетный комплекс «Конкурс»

В 1978 на вооружение был принят носимый противотанковый ракетный комплекс «Метис» 9К115 (рис. 4) с противотанковой управляемой ракетой 9М115.



а ***б***

Рис. 4. Носимый противотанковый ракетный комплекс
а – «Метис»; б – «Метис-М1»

Это оружие предназначено для усиления боевой мощи подразделений ротного звена мотострелковых дивизий, как правило, имеющих на вооружении только огнестрельное оружие и ручные гранатометы, которые мало эффективны для борьбы с танками из-за низкой точности и малых дальностей прицельной стрельбы.

В результате модернизации комплекса «Метис» в 2015 году был разработан ПТРК «Метис-М1» (рис. 4) с увеличенной дальностью стрельбы, бронепробиваемостью, оснащенный тепловизионным прицелом для стрельбы ночью и в затрудненных метеоусловиях.

Дальнейшая модернизация бронетанковой техники, направленная на повышение ее защиты (увеличение толщины брони, оснащение динамической защитой), а также увеличение дальности прицельной стрельбы танковых пушек, поставили перед разработками ПТРК задачи совершенствования их характеристик по увеличению дальности стрельбы и повышению могущества боевых частей.

Следующим этапом создания ПТРК явилась разработка комплексов третьего поколения.

В АО «КБП» в марте 1998 года был принят на вооружение возимо-переносной ПТРК третьего поколения большой дальности «Корнет» с реализацией принципа прямой атаки ракет во фронтальную проекцию цели с полуавтоматической системой управления и наведением ракет по лазерному лучу.

При разработке элементов и систем ПТРК «Корнет» конструкторы использовали комплексный, системный подход с четким пониманием иерархии и подчиненности каждой решаемой задачи конечной цели – разработке надежного, качественного и эффективного образца.

В ходе разработки под руководством академика А.Г. Шипунова производилось неоднократное повышение заданных ТТХ, что позволило поставить на производство ПТРК, отвечающий самым высоким требованиям Заказчика.

Комплекс «Корнет-Э» является мощным оборонительно-штурмовым оружием мотострелковых подразделений сухопутных войск, используемым по любым целям противника, стратегическим резервом командира, так как позволяет решать боевые задачи до непосредственного огневого соприкосновения с войсками противника.

В 2013 году был разработан в рамках военно-технического сотрудничества комплекс «Корнет-ЭМ» (рис. 5), который являлся мощным оборонительно-штурмовым оружием, обеспечивающим поражение сильнозащищенных целей противника, в т.ч. низколетящих воздушных целей. Комплекс может применяться на различных шасси при решении широкого круга задач в любое время суток, в сложных метеоусловиях и при постановке помех.



Рис. 5. Противотанковый ракетный комплекс 9К128М-1 «Корнет-ЭМ»

Успех выполнения задач, возложенных на ПТРК, во многом определяется уровнем боевой подготовки расчетов ПТРК, их способностью к своевременному поражению целей в условиях быстрой смены боевой обстановки, в различных природно-климатических условиях, в любое время суток.

С целью обеспечения подразделений сухопутных войск современными эффективными средствами обучения был разработан ряд унифицированных учебно-тренировочных средств (классные и полевые тренажеры) для обучения и совершенствования навыков расчетов комплексов семейства «Фагот-Конкурс», «Метис», «Корнет».

В настоящее время на предприятии проводятся в инициативном порядке и по контрактам с Заказчиком работы, направленные на создание новых высокоэффективных комплексов РВ.

Целесообразно проводить системные исследования в части создания новых материалов, электронно-компонентной базы, новых взрывчатых веществ, элементов отечественных приборов наблюдения и методов испытаний.

Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что использование созданного академиком А.Г. Шипуновым системного подхода к разработке КВ, позволит разрабатывать высокоэффективное оружие для обеспечения обороны и безопасности нашей страны.

Список литературы

1. Акционерное общество «Конструкторское бюро приборостроения им. академика А.Г. Шипунова». 90 лет. Красноярск: ООО ИПК «Платина», 2017. 404 с.

2. Высокоточное оружие зарубежный стран. Том 1. Противотанковые ракетные комплексы: обзор.-аналит. справ / Конструкт. бюро приборостроения. Гос. унитар. предприятие: [принимали участие: В.М. Лихтеров и др.]. Тула: Бедретдинов и Ко, 2008.

3. Избранные труды академика А.Г. Шипунова: Сборник публикаций. В 3-х томах. М., Издательство Граница, 2017. Т. 2. 600 с.

Игнатов Александр Васильевич, д-р техн. наук, член-корреспондент РАРАН, директор по научной работе, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»,

Кондратьев Александр Геннадьевич, заместитель директора по научной работе – начальник отделения, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»,

Пятницкий Ярослав Сергеевич, заместитель начальника отделения, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»,

Исаева Элеонора Сергеевна, ведущий инженер-исследователь, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»

APPLICATION OF METHODS OF SYSTEMS APPROACH DURIND MISSILE ARMAMENT DEVELOPMENT AT JSC «KBP»

A.V. Ignatov, A.G. Kondratiev, Y.S. Piatnitskiy, E.S. Isaeva

The article is devoted to the use of methods of systems approach during development of the missile weapon systems at JSC «KBP». It considers main samples of antitank missile weapon systems developed at the company. The article presents concepts of creating potential antitank missile weapon systems.

Key words: missile armament, antitank missile weapon systems, high-precision weapon, systems approach.

Ignatov Alexander Vasilyevich, doctor of technical sciences, corresponding member of the Russian Academy of Sciences Scientific, activities director, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Kondratiev Alexander Gennadievich, deputy Activities director – head of division, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Pyatnitskiy Yaroslav Sergeevich, deputy chief of division, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Isaeva Eleonora Sergeevna, research engineer, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP»

УДК 623.467

ВЛИЯНИЕ ЭНТРОПИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБРАЗЦА НА ВЕРОЯТНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ЗАДАЧ

В.А. Мальцев, Н.В. Майоров

Рассмотрена и приведены результаты надежности системы «специалист-образец вооружения» (СОВ), влияние энтропии на вероятность выполнения задач эргатической системой.

Ключевые слова: военная эргатическая система, специалист-образец вооружения, оценка надежности.

В процессе функционирования военной эргатической системы «специалист-образец вооружения» в различных режимах образец, как техническая составляющая эргатической системы, может отказывать, а обслуживающий персонал (номер расчета, специалист ремонтного органа) – допускать ошибки, но при определенных условиях компенсировать отказы техники и исправлять свои ошибки. Рассмотрим надежность такой системы, воспользовавшись структурным методом оценки вероятности выполнения эргатической системой детерминированной задачи, предложенным профессором А. И. Губинским [1]. При оценке надежности систем СОВ обычно принимаются следующие допущения: отказы образца и ошибки оператора являются случайными и независимыми событиями; появление более одного однотипного события за время работы системы от τ до $\Delta\tau$ невозможно; способности к восстановлению отказавшей технической подсистемы образца и к безошибочной работе являются независимыми свойствами оператора.

Тогда надежность эргатической системы, выраженная через вероятность выполнения системой задачи, в соответствии с общими правилами нахождения вероятности сложных событий, определится зависимостью:

$$P_{ЭС} = K_{ОП}[K_T \cdot P_{ВО} \cdot P_{ПО} \cdot P_{ОП} \cdot P_{СВ} + (1 - K_T \cdot P_{ВО} \cdot P_{ПО}) P_{Вос} \cdot P_{ОП} \cdot P_{СВ} + \\ + (1 - P_{ОП}) P_{ВО} \cdot P_{ПО} \cdot P_{Исп}], \quad (1)$$

где $K_{ОП}$ – коэффициент готовности оператора; K_T – коэффициент технической готовности образца; $P_{ВО}$ – вероятность того, что в образце не произойдет внезапный отказ; $P_{ПО}$ – вероятность того, что в образце не произойдет постепенный отказ; $P_{ОП}$ – вероятность безошибочной работы оператора; $P_{СВ}$ – вероятность своевременного выполнения алгоритма (задачи) оператором; $P_{Вос}$ – вероятность восстановления отказавшей подсистемы (механизма) образца; $P_{Исп}$ – вероятность исправления ошибки при ее появлении.

С учетом подхода, сформулированного в [2], и результатов исследований авторов [3,4] при определении $P_{ЭС}$ целесообразно использовать обобщенный показатель эффективности алгоритмической работы оператора в виде интегрального критерия:

$$P_{БС} = \int_{\Omega} \varphi(\tau, \alpha) W(\tau) d\tau, \qquad (2)$$

где $P_{БС}$ – вероятность безошибочного и своевременного решения задач; $\varphi(\tau, \alpha)$ – плотность распределения вероятности времени решения задач; $W(\tau)$ – условная эффективность деятельности оператора для случая, когда результат функционирования принял значение τ.

Тогда зависимость (1) можно записать в виде:

$$P_{ЭС} = K_{ОП}[K_T \cdot P_{ВО} \cdot P_{ПО} \cdot P_{БС} + (1 - K_T \cdot P_{ВО} \cdot P_{ПО}) P_{Вос} \cdot P_{БС} + \\ + (1 - P_{БС}) P_{ВО} \cdot P_{ПО}], \qquad (3)$$

На рисунке показаны зависимости вероятности выполнения поставленной задачи эргатической системой от изменения различных составляющих выражения (3).

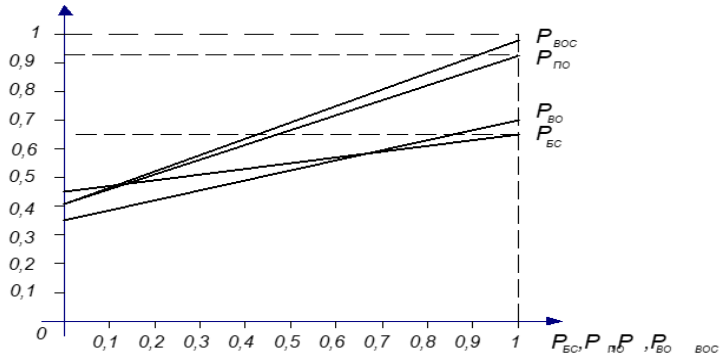


Рис. 1. Зависимость $P_{ЭС}$ от $P_{ВОС}$, $P_{ПО}$, $P_{ВО}$, $P_{БС}$

Как видно из рисунка, возрастание любой из величин $P_{ВОС}$, $P_{ПО}$, $P_{ВО}$, $P_{БС}$ приводит к повышению вероятности выполнения системой задач (значение $P_{ЭС}$ приближается к единице). Другими словами, для обеспечения эффективного функционирования эргатической системы в предписанном режиме, необходимо, чтобы образец вооружения обладал высокой надежностью и обслуживаемостью, а оператор имел возможность своевременно и безошибочно выполнять предписанные алгоритмы. С позиций информационного подхода это означает, что образец вооружения, как источник информации, должен обладать необходимыми эксплуатационными свойствами, а оператор способен в течение заданного промежутка времени обработать необходимый объем информации.

Как было показано выше, при решении задач управления процессами функционирования системы СОВ удобно пользоваться энтропией, как обобщенной информационной характеристикой состояния подсистем образца вооружения.

Энтропия $H_{ВО}(\tau, \Delta\tau)$, обусловленная вероятностью внезапных отказов $P_{ВО}$, определяется по формуле:

$$H_{BO}(\tau, \Delta\tau) = -\left[P_{BO}(\tau, \Delta\tau) \log_2 P_{BO}(\tau, \Delta\tau) + \overline{P}_{BO}(\tau, \Delta\tau) \log \overline{P}_{BO}(\tau, \Delta\tau)\right], \qquad (4)$$

где $\overline{P}_{BO}(\tau, \Delta\tau)$ – вероятность внезапного отказа образца в интервале времени $\tau + \Delta\tau$.

Связь энтропии с вероятностью выполнения непосредственно образцом (как технической составляющей системы СОВ) задачи, выраженная формулой (4), очевидна и не требует дополнительного пояснения.

Энтропию, обусловленную постепенными отказами (для случая нормального закона распределения вероятностей значений выходных параметров), определяют по формуле:

$$H_{ПО}(\tau, \Delta\tau, x) = \log_2 \sigma_x \sqrt{2\pi e}, \qquad (5)$$

где $\sigma_x = \sqrt{D}$ – теоретическое среднее квадратическое отклонение случайной величины (параметров контроля образца).

Зависимость же, выражающая связь вероятности выполнения образцом задачи с энтропией его состояния, имеет вид

$$P_{ПО} = 2^{-H_{ПО}} e^{1/2} \int_{g_x} \exp\left\{-\frac{(x-\bar{x})^2 \pi e}{2^{2H_{ПО}}}\right\} dx . \quad (6)$$

Из приведенных зависимостей (3), (4), (6) видно, что существует непосредственная связь вероятности выполнения системой СОВ задачи с энтропией состояния образца вооружения, как объекта управления [5], и составной части исследуемой системы.

Поэтому совершенствование существующих или разработка новых методов информационной (энтропийной) оценки таких состояний позволит уже на этапе проектирования СОВ спрогнозировать эффективность решения системой закладываемых в ТТЗ задач.

Список литературы

1. Зароковский Г.М., Павлов В.В. Закономерности функционирования эргатических систем. М.: Радио и связь, 1987. 232 с.

2. Фокин Ю.Г. Оператор – технические средства: обеспечение надежности. М.: Воениздат, 1985. 192 с.

3. Максин А.А., Мальцев В.А. Методологические основы информационно-системного анализа и оценки приспособленности к эксплуатации перспективных образцов РАВ на стадии их разработки: монография. М.: Изд. 3 ЦНИИ МО РФ, 2002. 162 с.

4. Мальцев В.А., Алчинов В.И. Схема решения задачи информационной обеспеченности ракетных систем на этапе их проектирования // Научн. техн. сборн. №8. Тула: ТВАИУ, 1990. С. 23 - 26.

5. Инженерная психология в военном деле / В.М. Ахутин, Г.М. Зараковский, Б.А. Королев и др. Под ред. Б. Ф. Ломова. М.: Воениздат, 1983. 224 с.

Мальцев Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, начальник управления, cps-kbp@mail.ru, Россия, Тула, АО «КБП»,

Майоров Николай Викторович, канд. техн. наук, начальник бюро, n.major28@mail.ru, Россия, Тула, АО «КБП»

INFLUENCE OF ENTROPY OF TECHNICAL CONDITION OF THE SAMPLE ON PROBABILITY OF PERFORMANCE BY ERGATIC SYSTEM OF TASKS

V.A. Maltcev, N.V. Mayorov

Considered hereby and are given results of reliability of system «arms specialist sample» (ASS), influence of entropy on probability of performance of tasks by ergatic system.

Key words: military ergatic system, arms specialist sample, reliability assessment.

Maltcev Vladimir Alekseevich, doctor of technical sciences, professor, head of department, cps-kbp@mail.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Mayorov Nikolay Viktorovich, candidate of technical sciences, n.major28@mail.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»

УДК 620.17

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СОУДАРЕНИЯ

Э.Г. Синельников, А.Л. Копейка, Д.Ю. Детенышев

Проведен сравнительный анализ процесса высокоскоростного соударения и кумулятивных зарядов малой мощности.

Ключевые слова: космический мусор, высокоскоростное соударение, кумулятивный заряд, ударная волна.

С каждым годом возрастает загрязнение космического пространства. В связи с этим техногенный мусор и мелкие метеороиды становятся основными повреждающими факторами космических аппаратов (КА). Воздействие малоразмерных твердых частиц (МТЧ) приводит к нарушению работоспособного состояния КА и снижению надежности его функционирования.

Одним из направлений исследования воздействия МТЧ на элементы конструкции КА является выполнение исследований с использованием экспериментальных метательных установок.

Для моделирования высокоскоростного соударения МТЧ используют метательные установки, которые позволяют исследовать процесс соударения цельнометаллического ударника диаметром 1..30 мм и преграды в диапазоне скоростей от 0,5 км/с до 7 км/с. При этом высокоскоростное соударение ударника с преградой (выше 7 км/с) является малоисследованной областью. Это обусловлено тем, что разгон до таких скоростей требует специальных разгонных устройств, представляющие собой дорогостоящие конструкции.

Поэтому в настоящее время сотрудниками ВКА имени А. Ф. Можайского проводится теоретический поиск иного способа выполнения воздействия на преграду, а именно использование небольших кумулятивных зарядов для моделирования высокоскоростного удара.

Данный вопрос является актуальным на сегодняшний день и требует дальнейшей проработки, однако, уже сейчас становится ясным, что необходимо учитывать ряд параметров:

размер и форма ударника;

материал ударника и преграды;

угол подхода ударника к преграде;

скорость подхода ударника к преграде;

температура материала преграды и др.

Результаты теоретических исследований могут быть использованы для различных преград:

соударение с бесконечными преградами, боковые и задняя стенки которых не оказывают существенного влияния на формирование кратера;

проникание в полубесконечные преграды, в которых отражение волн от задней стенки влияет на образование кратера;

пробивание тонких преград ударником с образованием снопа осколков, летящих с большими скоростями.

С практической точки зрения наиболее интересным является пробитие тонких преград. Так как результаты таких исследований могут быть использованы при проектировании двойной противометеорной защиты, предохраняющей космические аппараты от повреждения или разрушения при встрече с МТЧ.

Для изготовления противометеорной защиты используются различные материалы. При ударе МТЧ в противометеорную защиту представляющую собой листовой материал, чаще всего - это алюминиевые сплавы, генерируются высокие давления и температуры при которых может расплавиться или даже испариться материал в точке контакта [1].

При скорости МТЧ свыше 2 км/с в момент удара происходит мощный взрыв. Считается, что при мгновенном торможении металлического тела, движущегося с такой скоростью, весь запас кинетической энергии преобразуется в энергию мощной ударной волны и происходит инерциальный взрыв. Инерциальный взрыв металлического ударника происходит из-за коллективного перемещения почти свободных электронов внутри его кристаллической решетки, в результате чего электроны теряют способность соединять узлы решетки в прочный кристаллический каркас [2]. Инерциальный взрыв может охватить весь объем металлического ударника, если скорость удара о твердую преграду удовлетворяет неравенству:

$$V_{\text{уд}} \geq \sqrt{\frac{2E_{\text{уд}}}{m_{\text{уд}}}} \approx 10^4 \sqrt{\frac{2\varepsilon_{\text{уд}}}{A}},$$

где $V_{\text{уд}}$ – скорость ударника при столкновении с преградой; $E_{\text{уд}}$- кинетическая энергия ударника; $m_{\text{уд}}$ – масса ударника; $\varepsilon_{\text{уд}}$ – энергия металлической связи ударника; А – атомная масса его метала. В процессе инерциального взрыва металл становится жидкостью [3].

Аналогичная ситуация наблюдается и при пробивании преграды кумулятивной струей. Кумулятивный пест и преграда в месте соприкосновения расплавляются, и осколки вылетают в виде снопа капель расплавленных элементов.

В работе [4] говорится, что кумулятивную струю можно представить в виде истечения сильно сжатого металла в вакуум. Появление струи металла при кумулятивном эффекте обуславливается не плавление последнего, а его резкой пластической деформацией. Как и жидкость, металл облицовки при схлопывании воронки образует две зоны: собственно тонкую металлическую струю, перемещающуюся со сверхзвуковой скоростью вдоль оси заряда и пест-хвост, на долю которого приходится до 90% металлической облицовки воронки. При этом температура струи на выходе составляет около 400…600^{0}С, а скорость ее головной части может достигать 10 км/с [5].

В данной статье предлагается подход, позволяющий сопоставить два процесса - пробивание преграды высокоскоростным ударником и кумулятивной струей.

Встает вопрос, по каким параметрам проводить сравнение между двумя предложенными процессами:

по глубине пробития;

по образованной каверне;

по диаметру сквозного пробития;

по давлению в момент соударения.

Так как наибольший интерес представляют результаты пробивания тонких преград ударником с образованием снопа осколков, то будут сравниваться эти два процесса по диаметру сквозного пробития и по давлению в момент соударения.

При рассмотрении воздействия кумулятивной струи используется допущение, что на небольших расстояниях от заряда до преграды (до нескольких метров) сопротивлением воздуха можно пренебречь и рассматривать движение струи как в вакууме.

Для определения предельной скорости струи кумулятивного заряда $V_{\text{пр}}$, при которой может быть достигнуто полное расплавление преграды, предполагается, что преграда и струя состоят из одного материала.

Кинетическая энергия единицы массы струи ε_1 равна [5]:

$$\varepsilon_1 = \frac{V_{\text{пр}}^2}{2}. \quad (1)$$

Энергия, необходимая для расплавления единицы массы преграды, ε_2 равна:

$$\varepsilon_2 = q. \quad (2)$$

Для стали при обычных давлениях $q = 0{,}3$ ккал/г.

Сравнивая (1) и (2), можно получить $V_{\text{пр}}$. В нашем случае $V_{\text{пр}} = 1{,}6$ км/с.

Действительное значение $V_{\text{пр}}$ должно быть несколько больше, так как при высоких давлениях, испытываемых металлом преграды в момент удара, температура плавления и теплоемкость металла будут значительно больше, чем при нормальном давлении, $V_{\text{пр}}$ будет приближаться к $V_{\text{кр}}$. $V_{\text{кр}}$ – это скорость, при которой происходит пробивание преграды кумулятивной струей. Для обычной стали $V_{\text{кр}} = 2{,}05$ км/с.

В качестве основной прочностной характеристики материала преграды используется предельное давление $P_{\text{пр}}$. Для этого задаются различными значениями давления на границе раздела сред в момент удара P_x и вычисляют соответствующие им значения скорости кумулятивной струи V.

Исходное состояние вещества преграды перед фронтом ударной волны можно характеризовать значениями давления P_0, плотности ρ_0 и удельной внутренней энергии ε_0, состояние сжатого вещества за фронтом ударной волны – соответственно параметрами P_1, ρ_1, ε_1 [6].

При распространении ударной волны в веществе со скоростью V перемещение вещества за фронтом ударной волны характеризуется массовой скоростью u_1, а для вещества перед фронтом ударной волны массовой скоростью u_0.

С использованием данных параметров законы сохранения описываются с помощью уравнений Ренкина – Гюгонио:

$$\rho_0 V = \rho_1 (V - u_1), \quad (3)$$

$$P_1 - P_0 = \rho_0 V u_1, \quad (4)$$

$$P_0 u_1 = \rho_0 V((\varepsilon_1 - \varepsilon_0) - {u_1}^2/2). \quad (5)$$

Используя понятия удельного объема вещества $g_0 = 1/\rho_0$ и $g_1 = 1/\rho_1$, из уравнений (3) - (5) можно получить уравнение ударной адиабаты Гюгонио:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_0 = \frac{1}{2}(P_1 + P_0)(g_0 - g_1). \quad (6)$$

Ударная адиабата позволяет определить параметры вещества за фронтом ударной волны при известных исходных параметрах и термодинамических характеристиках вещества.

При достижении ударной волны поверхности преграды, противоположной точке удара, в преграде начинает распространяться обратная волна разряжения. Процесс разгрузки сжатого вещества носит изоэнтропический характер. Анализ ударной адиабаты и изоэнтропы позволяет найти полную и внутреннюю энергию, передаваемую веществу ударной волной.

Из уравнения (6) следует, что для интенсивных ударных волн при $P_1 \gg P_0$ полная переданная веществу энергия распределяется поровну между кинетической энергией и внутренней энергией, определяемой в данном случае по формуле:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_0 = \frac{1}{2} P_1 (g_0 - g_1). \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет получить формулу для вычисления давления за фронтом ударной волны:

$$P_{\text{уд}} = 2\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{(g_0 - g_1)}.$$

Из вышеизложенного следует, что можно определить давление $P_{\text{пр}}$, с которым кумулятивная струя воздействует на преграду и вычислить давление $P_{\text{уд}}$, возникающее в преграде за фронтом ударной волны при высокоскоростном соударении.

При равенстве этих двух величин ($P_{\text{уд}} = P_{\text{пр}}$) можно предположить, что ударник массой $m_{\text{уд}}$, обладающий скоростью $V_{\text{уд}}$, при высокоскоростном соударении ударника с преградой образуется сквозное отверстие такого же диаметра, как и кумулятивная струя с давлением $P_{\text{пр}}$.

С помощью программного пакета конечно-элементного анализа ANSYS для сравнения было выполнено численное моделирование процессов соударений стального шарика диаметром 2 мм, стального цилиндра (имитирующего кумулятивную струю) диаметром 2 мм (такого же объема, что и стальной шарик) со скоростью 4 км/с с дюралюминиевой пластиной. Результаты численного моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты численного моделирования

Ударник	Скорость, км/с	Максимальное давление, МПа
Сфера 2 мм	4	2582,2
Цилиндр, экв. 2 мм	4	2664,3

Из сравнительного анализа давлений в табл. 1 можно сделать вывод, что стальной шарик диаметром 2 мм при пробитии дюралюминиевой пластины оказывает такое же давление на преграду, как и стальной цилиндр такого же объема и такого же диаметра.

В дальнейшем было выполнено численное моделирование высокоскоростного соударения стального цилиндра диаметром 2 мм со стальной преградой толщиной 2 мм со скоростью 4 км/с (рис. 1).

А также были проведены экспериментальные исследования взаимодействия стального шарика диаметром 2 мм и преграды из стали толщиной 2 мм при скорости около 4 км/с (рис. 2, 3) [7].

Эксперименты проводились в ВКА имени А.Ф. Можайского на аттестованном экспериментальном баллистическом комплексе БС-3, который предназначен для исследований высокоскоростных соударений в диапазоне от 0,1 до 4,5 км/с.

Условия проведения экспериментальных исследований:

– температура окружающей среды, ^{0}C: 22 ± 5;

– относительная влажность воздуха, %: 65 ± 15;

– атмосферное давление, кПа: 101,3±4,0;

– диаметр ударника, мм: 2,0;

– толщина преграды, мм: 2,0.

Значение скорости ударника определялась по аттестованной «Методике определения скорости метаемого мела» [8]. Данная методика устанавливает метод, средства, алгоритм операций подготовки и выполнения измерений, а также правила обработки результатов измерений. Границы допускаемой относительной погрешности измерения скорости ударника по данной методике не превышают ± 2,0 % при доверительной вероятности P = 0,95.

Сравнительные результаты двух процессов представлены в табл. 2.

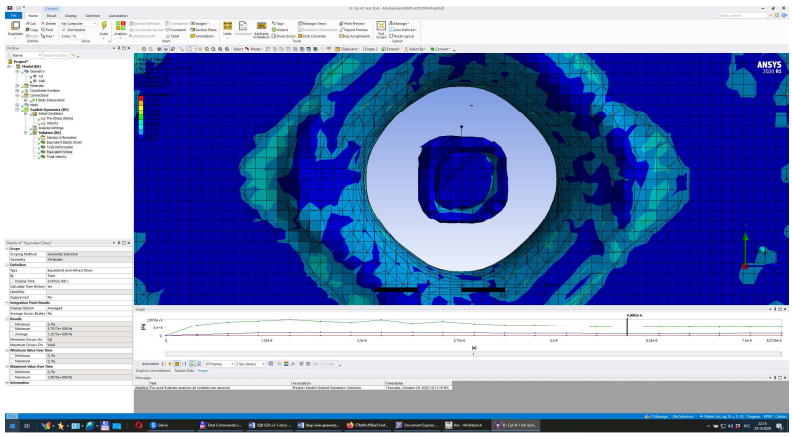


Рис. 1. Результаты численного моделирования высокоскоростного соударения стального цилиндра со стальной преградой



а ***б***

Рис. 2. Результат взаимодействия сферического ударника из стали диаметром 2 мм и преграды из стали толщиной 2 мм при скорости 3,97 км/с: а – вид с фронта; б – вид с тылу



а ***б***

Рис. 3. Результат взаимодействия сферического ударника из стали диаметром 2 мм и преграды из стали толщиной 2 мм при скорости 4,03 км/с: а – вид с фронта; б – вид с тылу

Таблица 2

Результаты численного моделирования и экспериментального исследования

Ударник	Скорость, км/с	Диаметр сквозного пробития, мм
Сфера (эксперимент 1)	3,97±0,08	4,7
Сфера (эксперимент 2)	4,03±0,08	4,9
Цилиндр (численное моделирование)	4	4,8

При проведении численного моделирования с помощью программы ANSYS можно контролировать следующие параметры: скорость ударника при выходе из преграды, процесс его разрушения, диаметр сквозного пробития, давление, возникающее при взаимодействии ударника и преграды.

Из сравнительного анализа результатов численного и экспериментального моделирования следует, что диаметр сквозного пробития при численном моделировании струи кумулятивного заряда имеет отклонение от результатов экспериментальных исследований высокоскоростного соударения на экспериментальном баллистическом комплексе БС-3 не более 2 %.

Таким образом, проведенные в работе исследования показали возможность проводить моделирование высокоскоростного соударения путем использования малых кумулятивных зарядов.

Данное решение позволяет определить характеристики малого кумулятивного заряда с целью имитации высокоскоростного соударения со скоростями свыше 7 км/с.

Список литературы

1. Зеленцов В.В. Защита космического аппарата от воздействия фрагментов мелкого космического мусора. Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 06. С. 123–142.

2. Марахтанов М.К., Велданов В.А., Максимов М.А., Тарасов М.А. Некоторые особенности взаимодействия металлического снаряда с металлической преградой // Известия РАРАН,2009. Вып.1 (59). С. 43–53.

3. Марахтанов М.И., Марахтанов А.М., Квантовая макроэлектроника: События микромира, объясняемые законами квантовой механики. Опыт и теория. М.: КРАСАНД, 2014. 776 с.

4. Новиков Н.П. О высокоскоростных кумулятивных струях // ЖПМТФ. 1962. № 6. С. 22–28.

5. Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва и удара. М.: Государственное издательство физико – математической литературы, 1959. 800 с.

6. Новиков Л.С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения космические аппараты: учебное пособие. М.: Университетская книга, 2009. 104 с.

7. Гончаров П.С., Житный М.В. Результаты экспериментальных иссслндований высокоскоростного удара по аллюминиевого-магниевому сплаву // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 11. 2018. С. 100–105.

8. Синельников Э.Г., Гончаров П.С. Методика определения скорости метаемого тела. СПб.: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2016. 29 с.

Синельников Эдуард Геннадьевич, старший научный сотрудник, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Копейка Александр Леонидович, канд. техн. наук, начальник 131 лаборатории, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Детенышев Дмитрий Юрьевич, курсант, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

ON THE POSSIBILITY OF USING SHAPED CHARGES TO SIMULATE HIGH-SPEED COLLISIONS

E.G. Sinelnikov, A.L. Kopeyka, D.Y. Detenyshev

A comparative analysis of the process of high-speed collision and shaped charges of low power was carried out.

Key words: space debris, high velocity impact, shaped charge, chock wave.

Sinelnikov Eduard Gennadievich, senior researcher, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Kopeyka Alexander Leonidovich, candidate of technical science, head of a laboratory, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Detenyshev Dmitriy Yuryevich, cadet, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy

УДК 621.455

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

П.С. Гончаров, В.В. Мартынов, Н.А. Шуневич, О.Ю. Цыбин

Рассмотрены принципиальная возможность и перспективы бортового аккумулирования энергии за счёт использования электромагнитного излучения плазмы электрического ракетного двигателя. Произведена оценка целесообразности идеи рекуперации энергии в ультрафиолетовом и в видимом спектре излучения в электрическом ракетном двигателе с использованием фотоэлектрических преобразователей.

Ключевые слова: электрический ракетный двигатель, плазма, спектр излучения, фотоэлектрический преобразователь.

Перспективным направлением научно-испытательной деятельности являются исследования в области совершенствования электрических ракетных двигателей (ЭРД). К ЭРД предъявляется требование большой суммарной продолжительности работы, что важно реализовать не только при дальних полётах космических аппаратов (КА), но и при многолетней орбитальной их эксплуатации, включая корректировку орбиты, операции ориентации, транспортировки грузов и т.д. Требование длительной работы ЭРД с невысокой создаваемой тягой сочетается с многократными циклами включений и остановок, что обычно не достигается химическим ракетным двигателем. Несмотря на то, что ЭРД существенно экономичны по бортовым затратам электрической энергии и рабочего тела (РТ), повышение энергетической эффективности является актуальной задачей.

Настоящая статья имеет целью оценить принципиальную возможность и перспективы использования фотонного излучения плазменной струи ЭРД. Излучение связано с эмиссией фотонов при нейтрализации ионов электронами, с колебаниями плазмы, а также с релаксацией возбужденных нейтральных частиц, теряющих энергию при переходе в основное состояние. С учётом того, что энергия плазменной струи в виде фотонного излучения безвозвратно теряется в космическом пространстве, предлагается исследовать возможность её частичного возврата, используя при этом фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) [1].

Первостепенной задачей исследований является подтверждение принципиальной возможности установки панелей солнечных элементов (СЭ) вблизи ЭРД. При этом под СЭ понимается конструктивное исполнение ФЭП. На следующем этапе предстоит исследовать перспективы получения энергии от светящейся струи ионизированной плазмы и оценить перспективы реализации такой технологии.

Генерирование электрической энергии на борту является ключевой задачей функционирования КА. Особое значение это имеет для КА, оснащённых ЭРД. Источником электрической энергии на различных КА могут быть аккумуляторы (запасённая энергия), панели СЭ (пополняемая энергия), ядерные энергетические установки и другие генераторы (производимая энергия). При этом бортовые энергетические установки используют всевозможные первичные источники энергии: компоненты ядерных и химических топлив; солнечное излучение; накопители в виде потенциальной энергии сжатых газов и т.д. Энергоёмкость большей части источников определяется их запасом на борту КА. При использовании солнечного света или излучения струи ЭРД энергоёмкость первичных источников достаточно высока, и даже при незначительных плотностях излучения может быть получено значительное количество дополнительной энергии за счет большого времени процесса энергопреобразования. Ни одной из систем энергоснабжения дополнительный источник энергии не помешает, а скорее, будет способствовать повышению энерговооружённости и ресурса КА. Понятно, что целесооб-

разность использования рассматриваемой технологии на различных КА получится не одинаковой. Значительный эффект видится при осуществлении дальних космических перелётов, когда ЭРД работает длительно, и рекуперация энергии осуществляется продолжительное время. Для КА, использующих солнечную энергетическую установку (СЭУ), может происходить падение мощности светового потока ввиду значительного удаления от источника света, нарушение ориентации аппарата или нахождение в теневой области планет, и значение дополнительной энергии возрастает. В КА с аккумуляторами электроэнергии масса батарей и зарядно-разрядных устройств составляет до 30-40 % массы всей СЭУ [2]. Новая технология позволит снизить этот показатель, а высвободившуюся массу использовать на установку необходимых панелей СЭ.

Для исследования возможности размещения панелей СЭ вблизи ЭРД необходимо рассмотреть влияние на них реактивной струи, состоящей в основном из ускоренных высокоэнергетических ионов. Струя ЭРД, в общем представлении, показана на рис. 1. Ядро струи условно ограничено конусом, угол полураствора которого называют углом расходимости струи. Для плазменно-ионных двигателей этот угол составляет около 15-20^0, для импульсных плазменных – 30^0, для стационарных плазменных – 30…45^0. Плотность ионного потока и средняя энергия ионов быстро спадает от оси струи к периферии и за пределами условного конуса частицы имеют существенно меньшие энергии, а плотности их потоков, по крайней мере, на порядок меньше, чем в ядре струи [3]. При этом возможные виды негативного воздействия струи ЭРД на панели СЭ – это:

эрозионное;
загрязняющее;
силовое;
тепловое.

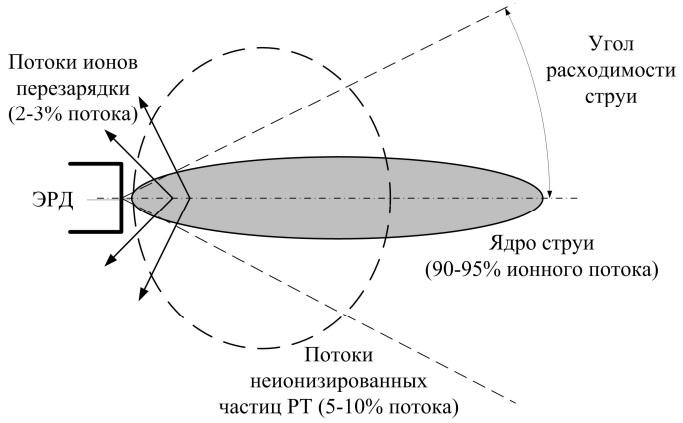


Рис. 1. Струя ЭРД

Изначально следует отметить, что единой теории, определяющей степень воздействия струи ЭРД на панели СЭ, нет. Однако есть результаты многолетних исследований и экспериментов, опираясь на которые можно вынести определённое заключение. Наибольший интерес для нас представляют эксперименты, проведённые в условиях экстремального воздействия струи ЭРД на панели СЭ. Имеются в виду условия, когда СЭ в течение определённого времени находятся непосредственно в зоне струи ЭРД. В 1974-1975 годах на КА «Метеор-Природа-1» был проведён космический эксперимент, когда струя ЭРД в течение 300 часов попадала на панели солнечных батарей под углом около 20^0. Результатом довольно продолжительного воздействия явилось снижение их электрической мощности на 5...6 % [4]. Похожие эксперименты проводились и в вакуумной камере. В течение 50 часов щадящего воздействия (температура СЭ около 40^0 С) произошло ухудшение характеристик батарей на 7 %, а в экстремальном режиме (температура поверхности СЭ до 150^0 С) – на 20 % [5]. Нагрев поверхности СЭ проис-

ходит за счёт ионной бомбардировки и теплового излучения двигателя и критичен при размещении панелей СЭ ближе 0,5 метра (для ЭРД большой мощности) [6]. Тепловое воздействие струи ЭРД на элементы конструкции КА за счёт ионной бомбардировки незначительно, за исключением случаев, когда они находятся в непосредственной близости или на оси струи. Поэтому в большинстве случаев этим видом воздействия можно пренебречь [3].

Даже в жёстких условиях комплексного воздействия струи (эрозионное, загрязняющее, силовое, тепловое) панели СЭ способны длительное время сохранять достаточно высокую работоспособность. Реализация идеи рекуперации энергии не предполагает экстремальных условий работы панелей СЭ. В штатных условиях эксплуатации показатель их деградации за счёт воздействия струи ЭРД вполне приемлем. На основании результатов лабораторных экспериментов и данных с геостационарных КА средние потери мощности панелей солнечных батарей, обусловленные негативным влиянием струи ЭРД, оцениваются на уровне 1,5…2,0 % за 10 лет [7].

Приведенные данные позволяют предположить, что панели СЭ, установленные за пределами условного конуса струи, способны к продолжительной работе. При этом степень их деградации в значительной степени будет определяться расстоянием от ядра струи ЭРД и, по предварительным оценкам, будет сопоставима с показателями деградации штатных панелей солнечных батарей.

Важным моментом использования панелей СЭ для преобразования энергии фотонного излучения плазменной струи ЭРД является анализ спектральных характеристик излучения источников света (Солнце и плазма ЭРД), рабочего спектра ФЭП и их взаимное сопоставление. Каждому типу ФЭП присущи свои параметры и характеристики, которые определяют его свойства и область применения. Важнейшими из них являются спектральная чувствительность и спектральная характеристика ФЭП. Спектральная чувствительность показывает, как ФЭП реагирует на излучение определённой длины волны. Она характеризует величину фототока, возникающую под действием единицы лучистого потока конкретной длины волны. Однако она не даёт полного представления о спектральных свойствах ФЭП. Для определения области применения ФЭП необходимо знать распределение его чувствительности по спектру, то есть спектральную характеристику. Анализ спектральных характеристик источника излучения и ФЭП определит их взаимную сопоставимость и эффективность применения.

Солнце имеет непрерывный спектр излучения, максимальное распределение энергии в котором соответствует длинам волн 400…800 нм (рис. 2). Плазменная струя тоже содержит практически весь спектр излучения, распределение энергии в котором зависит, прежде всего, от типа ЭРД и используемого РТ. Систематизированных данных в изучении данного вопроса недостаточно, имеются лишь результаты отдельных исследований. Например, экспериментальные исследования ЭРД типа СПД-70, использующего в качестве РТ ксенон, которые показали, что большая часть энергии выделяется в диапазоне 120…1000 нм, а её максимум соответствует длинам волн 480…540 нм [8]. Кроме того, представляют интерес результаты измерений потенциала плазмы, температуры ионов на основе доплеровского расширения спектральных линий и другие измерения энергетики ионов для различных режимов работы двигателей Холла и Кауфмана. [9, 10, 11]. Сопоставление представленных данных показывает соответствие спектров солнечного света и светимости плазменной струи ЭРД.

На рис. 3 представлена спектральная характеристика кремниевого ФЭП. Рабочий диапазон его чувствительности находится в широких пределах спектра, а максимальное значение коэффициента преобразования соответствует длинам волн около 800 нм. Для кремниевого ФЭП максимум спектральной чувствительности почти соответствует максимуму спектрального распределения энергии солнечного света.

Краткий анализ позволяет предположить адекватность восприятия рассматриваемых двух источников фотопреобразователем и заключить об удовлетворительной работе ФЭП от источника в виде фотонного излучения плазменной струи ЭРД.

Далее проведём анализ энергетических характеристик плазменной струи ЭРД, а точнее энергии её фотонного излучения. Большинство разрядных камер и плазменных струй ЭРД обладают собственной светимостью, обусловленной нагревом элементов конструкции двигателя и наличием в струе возбуждённых атомов и ионов. Общая мощность излучения обычно не превышает 10–15 % от мощности разряда в зависимости от типа двигателя и режима его работы [12]. Установлено, что около 90 % всей энергии в оптическом диапазоне длин волн выделяется в канале ЭРД. При этом основная часть излучения из канала распространяется в пределах конуса с углом полураствора 200. Освещённость от самой струи, как минимум, на порядок меньше освещённости от канала [8]. На рис. 4 представлено распределение светового потока по оси плазменной струи небольшого ЭРД. На некотором расстоянии от среза двигателя световой поток вначале возрастает, а затем происходит его плавный спад. Очевидно, что панели СЭ должны быть направлены преимущественно на зону максимального светового потока плазменной струи.

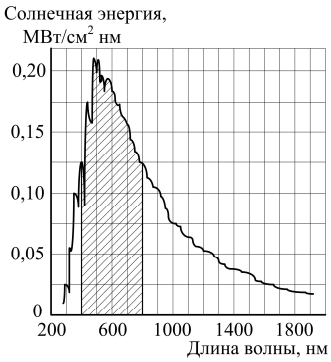


Рис. 2. Зависимость плотности солнечного излучения от длины волны

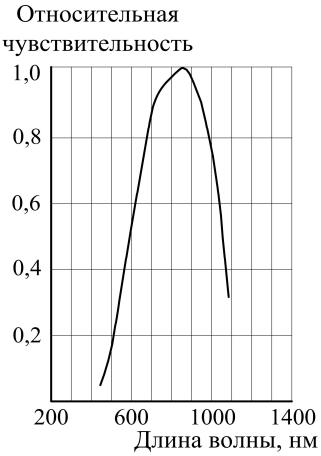


Рис. 3. Спектральная характеристика кремниевого ФЭП

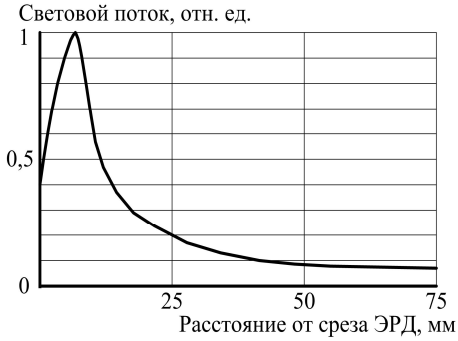


Рис. 4. Распределение светового потока по оси плазменной струи

Для оценки ситуации проведём экспресс-анализ энергии фотонного излучения плазменной струи ЭРД, например, СПД-140. Тип двигателя выбран, прежде всего, ориентируясь на предназначение (межорбитальная транспортировка), а значит – продолжительность работы и, соответственно, энергопреобразования. Электрическая мощность СПД-140 в некоторых исполнениях достигает 5 кВт. С учётом представленной информации, мощность излучения плазмы в канале ЭРД будет находиться в пределах 500…750 Вт, а плазменной струи, в лучшем случае, – 50…75 Вт. Современные достижения в области изготовлении ФЭП позволяют говорить о коэффициенте фотоэлектрического преобразования кремниевых и галлиевых панелей на уровне 24…25 %, а многослойных панелей на основе галлия (GaInP/GaAs/Ge) – 32 %. С учётом эффективности фотоэлементов удельная мощность установленных вблизи плазменной струи панелей СЭ может быть сопоставима с производительностью неориентируемых солнечных батарей, применяющихся на КА. Общим их преимуществом, отчасти компенсирующим относительно невысокую производительность, является отсутствие потребности в громоздких механизмах разворачивания панелей солнечных батарей и в системе их ориентации. А это около 46 % массы всей СЭУ [2]. При этом панели СЭ, установленные вблизи плазменной струи всегда направлены на источник излучения.

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского в сотрудничестве с Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого проводит исследования по созданию перспективного образца ионного ЭРД. В ходе выполнения основных задач программы экспериментальной отработки образца была выполнена пробная установка панелей СЭ в непосредственной близости от ЭРД. Эксперимент проводился в вакуумной камере, измерительный кабель через герморазъём выводился наружу. В качестве РТ поочерёдно использовали различные газы и газовые смеси (гелий, аргон, эле газ SF_6, воздух). Реакция фотопреобразователей на излучение струи ионного ЭРД фиксировалась с помощью вольтметра. Пробный эксперимент показал реалистичность такого способа получения энергии. Одновременно следует отметить, что продолжительная работа образца ионного ЭРД с использованием в качестве РТ воздуха способствовала образованию налета на поверхности ФЭП.

Таким образом, с помощью панелей СЭ можно получить энергию от фотонного излучения струи ЭРД. С учётом возможности длительного ведения процесса фотоэлектрического энергопреобразования количество возвращённой в бортовую сеть энергии может быть значительным. Однако доля рекуперируемой энергии в отношении к полной электрической мощности ЭРД видится небольшой – менее одного процента. Соответственно, на повышении КПД двигателя это скажется тоже незначительным образом. Продолжение исследований электромагнитного излучения плазмы двигателей различных типов и уровня мощности, использующих различные РТ, представляет существенный интерес для повышения энергетической эффективности ЭРД.

Список литературы

1. Патент 2726152 РФ, МПК H05H 1/54, F03H 1/00, B64G 1/54. Электрический ракетный двигатель (варианты) / П.С. Гончаров [и др.]. № 2019140727; заявлено 09.12.2019. Опубл. 09.07.2020. Бюл. № 19. 11 с.

2. Ермолаев В.И., Чилин Ю.Н., Наркевич Н.Н. Двигательные и энергетические установки космических летательных аппаратов / под редакцией А.П. Ковалёва. СПб.: Типография ФГУП ЦКБ «Рубин», 2003. 585 с.

3. Модель космоса: Научно-информационное издание: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. М.: КДУ, 2007. Т. 2. 1144 с.

4. Основные результаты космических испытаний ЭРДУ с СПД («ЭОЛ-2») на ИСЗ «Метеор-Природа». / А.И. Морозов [и др.]. // Тез. докл. IV Всесоюз. конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. М.: 1978. С. 317-321.

5. Асхабов С.Н. Исследование воздействия струи и теплового излучения ЭРД на солнечные батареи космического аппарата / С.Н. Асхабов [и др.]. // Космические исследования 1988. Т. 26, № 5. М., 1988. С. 796-798.

6. Надирадзе А.Б. Прогнозирование воздействия струй электроракетных двигателей на элементы системы космических летательных аппаратов. Дисс. докт. техн. наук. М.: 2003. 314 с.

7. Заявлин В.Р., Жезлов А.В., Летин В.А. Прогнозирование ресурса фотоэлектрических батарей космических аппаратов // Гелиотехника № 3. М.: 2001. С. 11-22.

8. Бугрова А.Н. Спектральные характеристики излучения плазмы УЗДП-ТВТ / А.Н. Бугрова [и др.]. М.: 1981. Т. 19, № 2. С. 428-430.

9. Milder N.L. Characteristics of the optical radiation from Kaufman thrusters / N.L. Milder, J.S. Sovey. NASA TN D-6565, 1971. 37 p.

10. Nishiyama K. Measurements of the Electromagnetic Emissions from the MUSES-C Ion Engine System. / K. Nishiyama [et al.]. // Paper IEPC-01-112 at the 27th International Electric Propulsion Conference. 15-19 October. Pasadena, 2001. 12 p.

11. Celik M., Batishchev O., Martinez-Sanchez M. Use of emission spectroscopy for real-time assessment of relative wall erosion rate of BHT-200 hall thruster for various regimes of operation. Vacuum, 2010. P. 1085–1091.

12. Важенин Н.А. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов и их влияние на радиосистемы космической связи / Н.А. Важенин [и др.]. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 432 с.

Гончаров Павел Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, начальник отдела (научно-исследовательского), vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,

Мартынов Виктор Васильевич, старший научный сотрудник, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Шуневич Николай Александрович, канд. техн. наук, начальник лаборатории (научно-исследовательской), vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,

Цыбин Олег Юрьевич, д-р физ-мат. наук, профессор, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

USE OF PLASMA ELECTROMAGNETIC RADIATION OF AN ELECTRIC ROCKET THRUSTER

P.S. Goncharov, V.V. Martynov, N.A. Shunevich, O.Y. Tsybin

The fundamental possibility and prospects of using electromagnetic radiation of the plasma of the electric rocket engine are considered. The feasibility of the idea of recovering energy in an electric rocket engine using photovoltaic converters has been evaluated.

Key words: electric rocket engine, plasma jet, radiation spectrum, photoelectric converter.

Goncharov Pavel Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, head of the department (research), vka@mil.ru, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Martynov Viktor Vasilievich, senior researcher, vka@mil.ru, Russia, St. Petersburg, A.F. Mozhaisky Military Space Academy,

Shunevich Nikolay Alexandrovich, candidate of technical sciences, head of laboratory (research), vka@mil.ru, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Tsybin Oleg Yurievich, doctor of physics and mathematics sciences, professor, vka@mil.ru, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

УДК 629.783

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ АНТЕНН КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А.М. Денисов, А.В. Корнилов, Т.С. Хубларова, А.М. Бабин

Представлены результаты анализа влияния частиц космического мусора на функционирование параболических антенн космических аппаратов. Выполнены классификация и описание процессов, связанных с воздействием космического мусора, представлены типовые структурно-логические схемы процессов нарушения функционирования антенных систем при воздействии, разработаны краткие рекомендации по обеспечению работоспособности данных систем в условиях нарастания загрязнения околоземного космического пространства.

Ключевые слова: космический аппарат, параболическая антенна, космический мусор, техногенное загрязнение.

Нарастающий темп космической деятельности определяет возрастающую роль частиц космического мусора (КМ), как фактора околоземного космического пространства (ОКП), определяющего работоспособность космических аппаратов (КА) и их бортовых систем. Вероятность столкновения с КМ в дальнейшем будет увеличиваться и за счет прогнозируемого повышения сроков активного существования КА.

По данным профильных подразделений NASA и космического командования США, суммарное количество космических объектов (КО) размером более 10 см, находящихся в ОКП в начале 2019 года, превысило 19000 [1, 2].

Число зарегистрированных КО пока относительно невелико и столкновений с ними можно избежать предварительным выбором параметров орбиты и маневрированием. Основным орбитальным космическим средством, в интересах обеспечения безопасности которого используется защитное маневрирование, является МКС. По состоянию на начало 2019 года было получено 586 предупреждений о нарушении зоны безопасности станции, в 24 случаях выполнены манёвры уклонения. Аналогичные маневры также выполняли отечественный КА «Канопус-В» №1 (сентябрь 2017 года) и американский КА «Терра» (июнь 2007 года) [3, 4].

Необходимо отметить, что условием успешного применения защитного маневрирования является создание и развитие систем контроля космического пространства (СККП), которые полноценно функционируют только в двух странах - США и Россия. Германский центр оценки космической обстановки использует для своей деятельности данные СККП США, в завершающей стадии создания находятся СККП Франции, Великобритании и Китая [3]. Предельный размер (при неточных характеристиках орбиты движения) обнаруживаемых объектов малоразмерного КМ составляет 2 мм на дальности 1000 км по результатам работы бистатического радиолокационного комплекса «Голдстоун» (Goldstone). Измерения радара используются также для калибровки моделей засо¬ренности ОКП, в частности, модели ORDEM (Orbital Debris Engineering Model) [5].

Особую опасность для КА во всех областях ОКП представляют некаталогизированные фрагменты КМ размерами от 0,1 до 10 см (до 30 - 100 см в области геостационарной орбиты), параметры орбитального движения которых невозможно определить существующими СККП.

Основным способом определения параметров ненаблюдаемой группировки малоразмерных фрагментов КМ в настоящее время является математическое моделирование. Существует ряд моделей КМ, к основным из которых относятся ORDEM-99 (NASA), MASTER-99 (ESA) и SDPA (Роскосмос). Несмотря на некоторые расхождения в результатах выполненных с их помощью расчетов, можно сделать общий вывод о возрастании объемной концентрации частиц КМ по мере уменьшения их размеров в зависимости, близкой к квадратичной [5, 6].

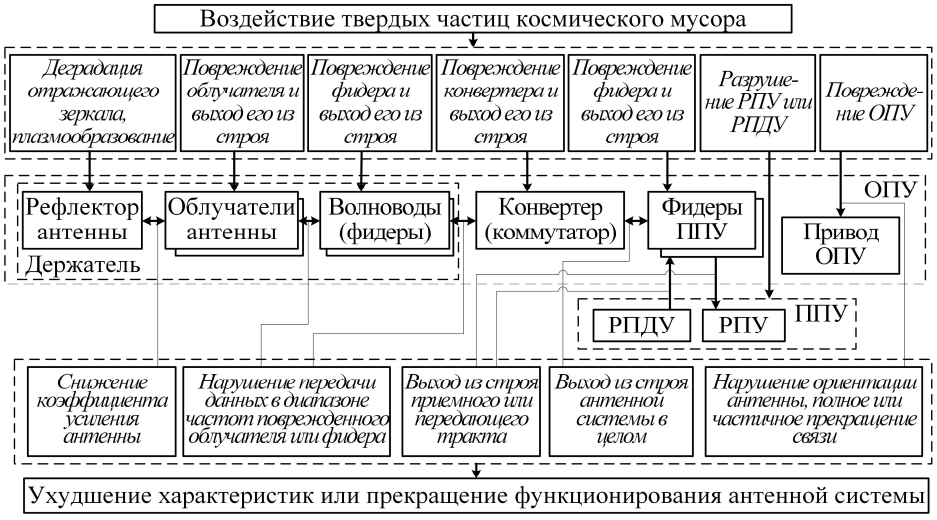
Исследование внешней поверхности элементов конструкции МКС, космических кораблей Space Shuttle, экспериментальной платформы LDEF, а также критичные повреждения некоторых КА в результате удара частиц КМ (например, разгерметизация системы терморегулирования КА «Экспресс-АМ11»), подтверждают наличие в ОКП большого количества частиц КМ, ненаблюдаемых существующими СККП [4 – 6].

Наиболее остро стоит проблема техногенного загрязнения геостационарной орбиты ввиду как сложности наблюдения и каталогизации КО, так и высокой степени использования космического пространства в окрестностях точек стояния. В данной области функционирует значительная часть орбитальных группировок КА отечественных и зарубежных космических систем связи и ретрансляции данных.

Это подтверждает актуальность исследования процессов функционирования КА связи в условиях воздействия мелких фрагментов КМ, разработки и совершенствования их защит, а также поиска других путей решения проблемы обеспечения работоспособности КА в условиях нарастающего загрязнения космического пространства. Одними из ключевых критичных элементов данных КА являются бортовые радиотехнические комплексы, в основе которых находятся антенны различных типов.

На современных КА связи, функционирующих на высокоэллиптических и геостационарных орбитах наиболее часто используются бортовые целевые системы на базе параболических антенн [7, 8].

Структурная схема типовой бортовой антенной системы и типовые процессы, происходящие при воздействии КМ на её элементы представлены на рисунке.



Структурная схема типовой антенной системы и основные процессы, происходящие при воздействии на неё частиц космического мусора

При анализе ударного воздействия фрагментов КМ на антенную систему целесообразно выделять:

- первичные процессы, непосредственно происходящие при воздействии КМ на элементы системы;

- вторичные процессы, обусловленные ухудшением характеристик поврежденных элементов.

Краткое описание процессов, связанных с воздействием КМ и их структурно-логические связи отражены на рисунке, детальный анализ функционального назначения элементов антенной системы и результатов воздействия на них частиц КМ приведен ниже.

Важнейшим элементом антенной системы является рефлектор. Он предназначен для пространственной селекции и усиления сигналов и позволяет формировать заданные диаграммы направленности антенн и требуемые коэффициенты усиления антенн.

Мелкие высокоскоростные частицы при соударении вызывают образование кратеров на поверхности рефлектора, тем самым постоянно деформируя поверхность рефлектора (так называемого «отражающего зеркала»).

Длительное воздействие мелких частиц на рефлектор ухудшает отражательную способность зеркала и тем самым снижают коэффициент усиления антенны в целом. Однако, следует заметить, что несмотря на большую площадь рефлектора и максимальную вероятность попадания в него частиц КА, рефлектор обладает наибольшей стойкостью к их воздействию. Фактически он выполняет дополнительную защитную функцию, как защитный экран для других элементов КА.

Воздействие достаточно крупных частиц КМ на рефлектор будет приводить к сквозному пробою его конструкции, что помимо уже описанных эффектов вызовет образование вторичных осколков, могущих повредить другие элементы КА.

Облучатели антенны предназначены для приема электромагнитной волны (ЭМВ), сфокусированной параболическим рефлектором, с заданной поляризацией и требуемого диапазона частот, в колебания сверхвысокочастотных (СВЧ) токов в волноводной или фидерной линии, а также для обратного преобразования при передаче сигналов.

При конструировании параболических антенн используют облучатели в виде полуволнового вибратора, открытого конца волновода, рупора и щели. Как правило, в антенне с одним рефлектором используются несколько облучателей позволяющих осуществить частотное и поляризационное уплотнение каналов связи. Входы облучателей находятся в фокусе рефлектора и направлены на него, поэтому мелкий КМ может воздействовать только на корпус облучателя. Корпус облучателей достаточно защищен от воздействия мелкого КМ. Более крупный КМ может пробить корпус облучателя, сломав его, тем самым выведя из строя часть системы дуплексной связи КА конкретного диапазона частот и поляризации. Однако облучатели других диапазонов и поляризаций смогут функционировать и далее в качестве резервных. То есть, вывод из строя одного облучателя не выведет из строя всю систему связи в целом. Если же резервных облучателей нет, то система связи полностью прекратит функционирование.

Держатели облучателей предназначены для удержания облучателей в фокусе рефлектора. Конструкционно облучатели могут крепиться к центру рефлектора, на треноге или внешнем держателе. Вывод из строя держателя в результате длительной деградации от воздействия мелкого КМ или ударного воздействия более крупного КМ может привести, либо к расфокусировке антенны с ухудшением качества связи, либо к полному прекращению функционирования антенной системы. При центральном креплении к рефлектору конструкция держателя может выполнять функцию волновода. В других случаях к держателю крепятся фидеры, передающие СВЧ колебания токов от облучателя к конвертеру и обратно на передачу. Фидеры могут крепиться как снаружи держателя, так и проходить внутри держателя. Частичное повреждение волноводов или фидеров частицами КМ приведет к ухудшению качества связи. Обрыв фидеров приведет либо к полной, либо к частичной (при наличии резервных фидеров) потере функциональности системы связи КА.

Конвертер предназначен для преобразования СВЧ колебаний токов в колебания токов промежуточных частот (ПЧ) и обратно при передаче. Для уменьшения потерь в приемном тракте конвертеры располагают максимально близко к антенне. Конвертеры могут выполнять функции коммутаторов, распределяющих ПЧ на все входы бортовых радиоприемных устройств (РПУ) КА а также выходы радиопередающих устройств (РПДУ) КА на входы конвертера при передаче. Конвертер (коммутатор) устанавливают рядом с рефлектором. Повреждение конвертера вызывает полное прекращение функционирования системы связи КА.

Фидерные линии предназначены для передачи колебаний ПЧ на входы РПУ КА и обратно на передачу сигналов от выходов РПДУ КА на входы конвертера (коммутатора). Число фидеров соответствует количеству РПУ и РПДУ на борту КА. Вывод из строя фидерной линии снизит характеристики бортовой системы связи в целом, так как исправные фидерные линии продолжат функционировать.

Бортовые РПУ КА предназначены для приема сигналов и сообщений пользователей системы связи КА. Как правило, используются многоканальные многодиапазонные цифровые РПУ или широкополосные РПУ с цифровой обработкой в широкой полосе, в зависимости от решаемых задач. Число РПУ зависит от конкретных задач, решаемых системой связи, с учетом обязательного резервирования. Для целей резервирования также применяется перекоммутация антенных трактов приема на любой вход РПУ. Выход из строя отдельного РПУ или повреждение его частицами КМ приведут к полному выходу одного из каналов связи и снижению качества процесса функционирования системы в целом.

Бортовые РПДУ КА устанавливаются в комплекте с РПУ КА и предназначены для передачи сигналов.

Приемо-передающее устройство КА, в состав которого входят РПУ и РПДУ, обеспечивает функционирование системы связи в целом. Его функциями являются переключение режимов работы системы связи КА, применяемые технологии передачи и приема информации, персональные настройки связного канального оборудования КА на связную приёмо-передающую аппаратуру корреспондентов, применяемые методы уплотнения каналов и канальные преобразования, выбор комплектов приемо-передающих антенн и управление их наведением на корреспондентов и т.д. Управление системой связи осуществляется командами по командным линиям управления и связи из наземных ПУ системой связи КА. Контроль функционирования системы связи КА осуществляется по каналам телеметрии, транслируемым с КА на наземные ПУ системой связи КА.

По результатам проведенного анализа влияния воздействия частиц КМ на функционирование бортовой антенной системы КА можно сделать следующие выводы:

1. Для текущего уровня загрязнения околоземного космического пространства наиболее вероятным результатом воздействия космического мусора является постепенное ухудшение характеристик антенной системы по причине деградации отражающих свойств поверхности рефлектора по причине попадания пылевых микрочастиц.

2. По мере прогнозируемого увеличения в ОКП объемной концентрации твердых частиц более крупных размеров (от 1 мм и более) существенно возрастет вероятность повреждения меньших по размеру, но более критичных к воздействию ключевых элементов антенной системы (фидеры, облучатели и пр.), выход из строя которых приведет к частичной или полной потере работоспособности системы.

3. Для обеспечения работоспособности антенных систем в условиях воздействия космического мусора в первую очередь целесообразно прорабатывать дополнительные меры по резервированию и защите критичных элементов (в первую очередь, конвертеров и фидеров, находящихся вне корпуса КА).

Список литературы

1. LEGEND: 3D/OD Evolutionary Model [Электронный ресурс] URL: https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/modeling/ legend.html (дата обращения: 23.12.2019).

2. Адушкин В.В., Аксенов О.Ю., Вениаминов С.С., Иванов С.И., Дедус Ф.Ф. О популяции мелкого космического мусора, её влиянии на безопасность космической деятельности и экологию Земли // Космический мусор: фундаментальные и практические угрозы: сборник Трудов Всероссийской научной конференции с международным участием. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 20–30.

3. Бурмистров В.В., Зайцев М.А., Раф.Р. Казаков, Рус.Р. Казаков. Виды защит космических аппаратов от космического мусора // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2015. Выпуск 649. С. 144–152.

4. Грудин Д.В., Мельников Е.К. Методы и практическая реализация уклонений МКС и других функционирующих космических аппаратов от опасно сближающихся с ними объектов космического мусора // Космический мусор: фундаментальные и практические угрозы: сборник Трудов Всероссийской научной конференции с международным участием. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 176–182.

5. Космический мусор. Кн. 1. Методы наблюдения и модели космического мусора / под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Г.Г. Райкунова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 248 с.

6. Назаренко А.И. Моделирование космического мусора. М.: ИКИ РАН, 2013. 216 с.

7. Сомов А.М., Корнев С.Ф. Спутниковые системы связи. Учебное пособие для вузов / под редакцией А.М. Сомова. М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 244 с.

8. Данилов И.Ю., Романов А.Г., Лаврушев В.Н., Седельников Ю.Е., Чони Ю.И. Новые технологии контроля спутниковых антенн аппаратуры космической связи на этапах разработки и испытаний // Электросвязь. 2019. №4. С. 22–28.

Денисов Андрей Михайлович, канд. техн. наук, доцент, докторант, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Корнилов Алексей Валерьевич, начальник лаборатории, vka@mil.ru, Россия, Санкт- Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Хубларова Татьяна Сергеевна, научный сотрудник, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Бабин Александр Михайлович, старший научный сотрудник, vka@mil.ru, Россия, Санкт- Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

ANALISIS OF THE INFLUENCE OF SPASE DEBRIS ON THE FUNCTIONING OF PARABOLIC ANTENNAS OF SPACECRAFT

A.M. Denisov, A.V. Kornilov, T.S. Khublarova, A.M. Babin

The results of the analysis of the influence of space debris particles on the functioning of parabolic antennas of spacecraft are presented. The classification and description of the processes associated with the impact of space debris are carried out, typical structural and logical diagrams of the processes of disruption of the functioning of antenna systems during exposure are presented, brief recommendations are developed to ensure the operability of these systems in conditions of increasing pollution of near-Earth space.

Key words: spacecraft, parabolic antenna, space debris, technogenic pollution.

Denisov Andrey Mikhailovich, candidate of technical science, docent, doctoral candidate, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Kornilov Aleksey Valerievich, head of a laboratory, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Khublarova Tatiana Sergeevna, researcher, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Babin Aleksandr Mikhailovich, senior researcher, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy

УДК 620.17

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА И ФРАГМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

М.В. Житный, П.С. Гончаров, Л.П. Зозуля, М.Ю. Булекбаева

Рассмотрена программная реализация модели движения космического аппарата и группы фрагментов космического мусора, возникающих в результате столкновения двух космических объектов. Основным результатом расчетов является значение минимального расстояния сближения между космическим аппаратом и фрагментом из состава рассматриваемой группы. В модели произведен учет возмущающих факторов, оказывающих влияние на движение объектов в околоземном пространстве.

Ключевые слова: космический мусор, столкновение, космический объект, космический аппарат, сближение.

В настоящее время количество некаталогизированных и регулярно наблюдаемых объектов искусственного происхождения размером 1…10 см находящихся на околоземных орбитах превышает 500000 [1]. В ближайшей перспективе ожидается значительный рост искусственных спутников Земли за счет существующей тенденции к выведению на околоземную орбиту космических аппаратов малого размера. Так, например, в течение последних двух лет на околоземную орбиту было выведено более 500 КА Starlink. Кроме того, большое распространение получают космические аппараты формата CubeSat, представляющие собой малые и сверхмалые аппараты, имеющие небольшие размеры и массу. Очевидно, что с увеличением числа КА возрастает вероятность их столкновения, которая будет, сопровождаться образованием большого количества фрагментов, возникающих в результате такого столкновения. Так проведенные экспериментальные исследования показали, что при столкновении КА CubeSat с частицей космического мусора (ЧКМ) происходит полное разрушение КА с образованием большого числа фрагментов, которое в зависимости от параметров движения и характеристик КА и ЧКМ может превышать 1000 [2].

Поэтому прогнозирование взаимного расположения фрагментов, образующихся в результате столкновения и последующего разрушения космических объектов (КО), относительно функционирующих КА является важной практической задачей.

Для решения этой задачи в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского был разработан программный модуль, предназначенный для прогнозирования опасного сближения КА с фрагментами, образующимися в результате столкновения КО.

В основе алгоритма программного модуля лежат следующие допущения и ограничения:

рассматривается столкновение двух космических объектов;

в качестве точки встречи космических объектов принимается пространственная точка пересечения их орбит, при этом процесс движения КО до момента встречи не моделируется, поскольку столкновение КО, орбиты которых пересекаются, является событием, вероятность возникновение которого при определенных начальных условиях может быть близка к нулю;

модель атмосферы – стандартная;

движение КА (фрагмента) – возмущенное;

известны элементы орбиты КА (КО).

В качестве начальных условий для решения задачи принимаются следующие:

кеплеровские элементы орбиты космических объектов;

кеплеровские элементы орбиты космических аппаратов, соответствующие заданному времени;

время столкновения космических объектов;

количество фрагментов, образующихся в результате столкновения космических объектов;

период времени, на который осуществляется прогноз опасного сближения фрагментов и КА;

значение критериального параметра, определяющего границу зоны опасного сближения;

шаг интегрирования системы дифференциальных уравнений.

Можно выделить следующие основные программные блоки, используемые в модуле:

блок перехода между различными системами координат (используются абсолютная геоцентрическая экваториальная система координат (АГЭСК), гринвичская система координат (ГСК), а также кеплеровские элементы орбиты (КЭО));

блок расчета кинетических параметров движения КА (КО, фрагмента);

блок определения координат точки встречи космических объектов и моделирования начальных условий движения фрагментов, образующихся при столкновении космических объектов;

модуль, предназначенный для моделирования орбитального движения КА (КО, фрагмента).

В процессе орбитального полета, в результате воздействия внешних возмущающих сил, КА совершает сложное поступательно-вращательное движение. На практике такое движение принято разделять на движение центра масс КА и движение вокруг центра масс. Поскольку решаемая задача не требует знания углового положения КА или КО, то в программном модуле рассматриваемые объекты приняты в качестве материальных точек. При этом для более точного вычисления элементов орбиты КА (КО, фрагмента) учитывается ряд возмущающих факторов, которые вызывают отклонение от кеплеровского движения. К основным из таких факторов относятся дополнительные сила притяжения Земли, с учетом несферичности Земли, силы притяжения Луны, Солнца и других планет, аэродинамические и электромагнитные силы, световое давление.

Уравнение, описывающее движение центра масс КА (фрагмента) и учитывающее влияние возмущающих сил в гринвичской системе координат имеет следующий вид:

$$m_{KA}\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \sum_{i=1}^{n}\vec{F}_i + \vec{J}_e + \vec{J}_c$$

где $\sum_{i=1}^{n}\vec{F}_i$ – совокупность внешних сил, действующих на КА; m_{KA} – масса КА (фрагмента); $\vec{r}$ – радиус-вектор центра масс; $\vec{J}_e$ – переносная сила инерции; $\vec{J}_c$ – кориолисова сила инерции.

Совокупность внешних сил определяется следующим соотношением:

$$\sum_{i=1}^{n}\vec{F}_i = \vec{G} + \vec{R} + \vec{F}_C + \vec{F}_Л$$

где $\vec{G}$ – сила притяжения Земли; $\vec{R}$ – аэродинамическая сила; $\vec{F}_C$ – сила притяжения Солнца; $\vec{F}_Л$ – сила притяжения Луны.

При этом используются следующие расчетные условия:

модель Земли представляет собой общий земной эллипсоид (ОЗЭ);

Земля вращается вокруг своей оси с постоянной угловой скоростью $\Omega_З$;

гравитационное поле Земли нормальное;

модель атмосферы принята в соответствии с ГОСТ 4401-81;

на движение КА (КО, фрагмента) оказывают влияние силы притяжения Луны и Солнца;

КА (КО, фрагмент) считается материальной точкой;

центр масс Земли движется равномерно и прямолинейно.

Моделирование начальных условий движения фрагментов, образующихся в результате столкновения космических объектов, реализовано на основе математической модели, представленной в [3]. При этом реализованы следующие основные этапы моделирования:

определение координат и проекций скорости движения на выбранную систему координат для каждого КО в точке встречи;

определение проекций скорости движения на выбранную систему координат группового (составного) космического объекта, образовавшегося в результате абсолютно неупругого столкновения двух космических объектов;

определение начальных условий движения (координат и проекций скорости на выбранную СК) для каждого фрагмента из заданного в начальных условиях общего числа образующихся фрагментов.

Блок-схема алгоритма моделирования приведена на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения расстояния сближения между КА и фрагментом космического мусора

Процесс образования фрагментов в результате столкновения двух КО носит случайный характер, что обусловлено большим числом факторов, влияющих на его течение (скорости КО в точке встречи, угол встречи, форма, материал и конструкция КО, внешние возмущающие факторы и пр.). Для учета данной особенности используется допущение, что образующиеся фрагменты равномерно распределены по сфере с заданным радиусом, таким образом, что на двух произвольных элементах этой сферы с одинаковыми площадями будет содержаться одинаковое количество фрагментов. При этом генерация положения фрагментов производится на основе следующих зависимостей:

$$\Theta = 2 \cdot \pi \cdot \xi; \ \varphi = \arccos(2 \cdot \upsilon - 1),$$

где Θ, φ – углы, задающие положение центра масс фрагмента в сферической системе координат; ξ, υ – случайные вариации, равномерно распределенные на промежутке [0, 1].

Проекции вектора скорости разлета фрагментов определяются относительно системы координат с центром в точке соударения, оси которой направлены параллельно осям АГЭСК, и для первого космического объекта, из участвующих в столкновении, имеют следующий вид:

$$\Delta V_{1i\,x\,АГЭСК} = \Delta V_{1i} \cdot \cos\Theta \cdot \cos\varphi$$

$$\Delta V_{1i\,y\,АГЭСК} = \Delta V_{1i} \cdot \sin\Theta \cdot \cos\varphi$$

$$\Delta V_{1i\,z\,АГЭСК} = \Delta V_{1i} \cdot \sin\varphi$$

где ΔV_{1i} – добавочная относительная скорость разлета фрагментов, образующихся от разрушения первого КО.

Аналогично составляются выражения и для проекции вектора относительной скорости разлета фрагментов, образующихся от второго КО.

Окончательно проекции абсолютной скорости разлета образовавшихся фрагментов относительно АГЭСК вычисляются в следующем виде:

$$V_{1i\,x\,АГЭСК} = \Delta V_{KOx_{АГЭСК}} + \Delta V_{1i\,x\,АГЭСК}$$

$$V_{1i\,y\,АГЭСК} = \Delta V_{KOy_{АГЭСК}} + \Delta V_{1i\,y\,АГЭСК}$$

$$V_{1i\,z\,АГЭСК} = \Delta V_{KOz_{АГЭСК}} + \Delta V_{1i\,z\,АГЭСК}$$

где $\Delta V_{KOx_{АГЭСК}}, \Delta V_{KOy_{АГЭСК}}, \Delta V_{KOz_{АГЭСК}}$ – проекции абсолютной скорости движения объекта, образовавшегося в результате столкновения двух КО, на оси АГЭСК.

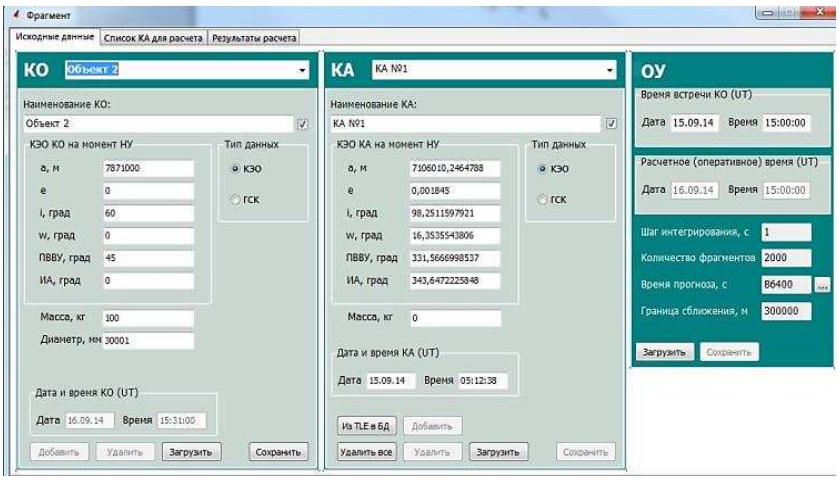


Рис. 2. Исходные данные (фрагмент)

На рис. 2 показан фрагмент окна программы, содержащего исходные данные, использованные для проведения расчета, результаты которого приведены на рис. 3.

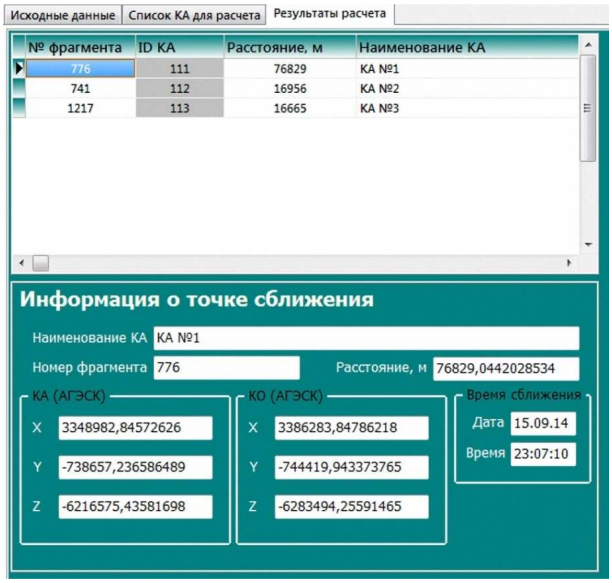


Рис. 3. Результаты расчета (фрагмент)

Кроме представленных на рис. 3 результатов могут быть получены и другие. Так на рис. 4, в качестве примера, показана динамика разлета фрагментов, возникающих в результате столкновения двух КО, для трех последовательных моментов времени (t_1, t_2, t_3), основанная на результатах проведенных расчетов для фиксированного количества фрагментов (расчет для 100 фрагментов), где белыми точками условно обозначены рассматриваемые фрагменты.

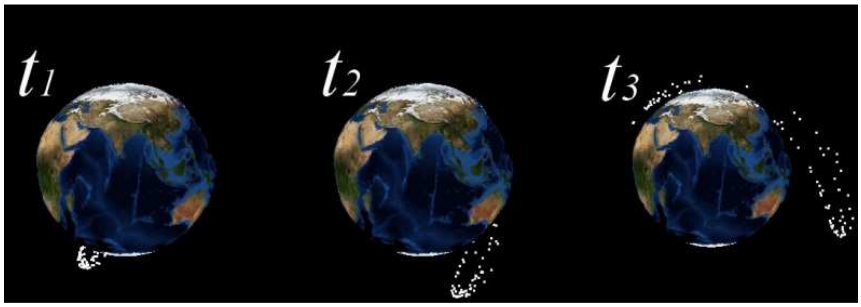


Рис. 4. Динамика разлета фрагментов,
возникающих в результате столкновения двух космических объектов

Таким образом, разработанный программный модуль позволяет на основе известных данных о космических объектах и космических аппаратах осуществить прогнозирование минимального расстояния сближения между КА и фрагментами частиц космического мусора, образующимися в результате столкновения двух космических объектов. Получаемые в ходе моделирования результаты могут быть использованы для решения ряда практических задач, например, определения угла подлета фрагмента космического мусора к КА и значения абсолютной и относительной скоростей фрагмента разрушения КО, определения вероятности столкновения КА с фрагментами, образованными в результате столкновения двух космических объектов и других.

Список литературы

1. Вениаминов С.С. Космический мусор – угроза человечеству. М.: ИКИ РАН, 2010. 207 с.

2. Назаренко А.И. Моделирование космического мусора // Серия «Механика, управление и автоматика». М.: ИКИ РАН, 2013. 216 с.

3. Зозуля Л.П., Гончаров П.С. Математическая модель движения фрагментов разрушения космических объектов при высокоскоростном соударении // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: ТулГУ. 2019. Вып. 6. С. 110–116.

Житный Михаил Владимирович, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Гончаров Павел Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, начальник отдела, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,

Зозуля Людмила Петровна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Булекбаева Марина Юрьевна, младший научный сотрудник, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

SOFTWARE MODULE FOR EVALUATING THE RELATIVE POSITION BETWEEN SPACECRAFT AND SPACE DEBRIS FRAGMENTS

M.V. Zhitnyy, P.S. Goncharov, L.P. Zozulya, M.Y. Bulekbaeva

The software implementation of the model of the motion of a spacecraft and a group of fragments of space debris arising from the collision of two space objects is considered. The main result of the calculations is the value of the minimum rendezvous distance between the spacecraft and a fragment from the group under consideration. The model takes into account the disturbing factors that affect the movement of objects in near-earth space.

Key words: space debris, collision, space object, spacecraft, relative position.

Zhitnyy Mihail Vladimirovich, candidate of technical science, docent, senior researcher, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Goncharov Pavel Sergeevich, candidate of technical science, head of department, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Zozulya Ludmila Petrovna, candidate of technical science, senior researcher, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Bulekbaeva Marina Yurievna, junior researcher, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy

УДК 62-83-52.001.5; 075.8

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ДОБЫЧИ С АДАПТАЦИЕЙ К РАЗНОВИДНОСТЯМ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

Д.М. Шпрехер, А.В. Зеленков

Рассмотрен перспективный способ управления электроприводом очистного комбайна, основанный на применении аппарата нечеткой логики. Разработана база правил нечёткого логического вывода в численной форме и проведено имитационное моделирование в среде MATLAB/Simulink с целью сравнения исследуемой и классической схемы управления, основанной на ПИ законе регулирования

Ключевые слова: очистной комбайн, максимальный ток, скорость подачи, нечеткая логика.

Развитие энергетики в мире, и в частности в России, все больше будет ориентироваться на использование каменного угля. Подземный способ добычи угля в настоящее время ориентирован на использование очистных механизированных комплексов, в которых очистной комбайн выполняет основную функцию — разрушения горной породы и ее погрузку на забойный конвейер [1]. На технологический процесс угледобычи, как и на многие другие, влияет большое число случайных факторов, основным из которых является сопротивляемость угля резанию, обусловленная в том числе содержанием крупных консолидированных включений (линз, окатышей, валунов). В реальности не представляется возможным учесть большую часть влияющих факторов, такие задачи чрезвычайно сложные, а процессы по своей сути нечеткие. В данных условиях целесообразным является разработка и применение регуляторов, параметры которых адаптируются так, чтобы при изменяющихся параметрах объекта точность и качество управления процессом угледобычи оставались в заданном диапазоне значений. Таким образом, актуальной задачей является формирование идентификатора объекта управления на основе нечеткой и неполной информации.

Объектом управления для разрабатываемого регулятора является модель очистного комбайна, состоящая из двух систем приводов: привода подачи и привода резания.

У рассматриваемой системы можно выделить следующие выходы:

Скорость подачи (перемещения) комбайна $V_{\text{п}}$;

Ток потребляемый двигателем привода резания $I_{\text{р}}$.

Для управления комбайном используется вход преобразователя частоты (ПЧ), питающий электродвигатель подачи.

Задача управления: Управляя ПЧ схемы питания двигателя подачи необходимо обеспечить номинальный ток потребления двигателя резания и не допустить превышения скоростью комбайна допустимого уровня.

Для решения поставленной задачи управления необходимо задать следующие выходные параметры комбайна.

Отметим, что объект управления имеет следующую особенность – скорость перемещения комбайна пропорциональна управляющему воздействию на ПЧ схемы питания электродвигателя подачи. Следовательно, ограничения 2 и 3 можно интерпретировать как ограничения на выходное воздействие системы управления. Допустимые выходные параметры очистного комбайна приведены в табл. 1.

В результате остается один входной параметр, по которому необходимо реализовать управление объектом.

Использование нечеткой логики [2] для организации систем управления показало хорошую применимость при недостаточном знании объекта управления, а также в случаях, когда по условию задачи необходимо использовать знания эксперта.

Таблица 1

Допустимые выходные параметры очистного комбайна

Параметр	Размерность	Значение	Описание
$I_{\text{р.ном}}$	А	120	ток потребления АД привода резания в номинальном режиме
$V_{\text{п}.min}$	м/с	1	минимальная скорость перемещения комбайна с точки зрения устойчивости двигателя подачи
$V_{\text{п}.max}$	м/с	8	максимально допустимая скорость перемещения комбайна с точки зрения паспортных данных и техники безопасности

Под нечетким управлением понимается стратегия управления, основанная на эмпирически приобретенных знаниях («опыте эксперта») о функционировании объекта, при которой сложные отношения между входом и выходом регулируемого процесса представляются в лингвистической форме в виде некоторой совокупности нечетких инструкций (правил) (IF – THEN). На рис. 1 представлена типовая структурная схема системы управления с нечетким регулятором.

Модель данного типа регулятора реализована в приложении Matlab/Simulink. Внешний вид реализованного нечеткого регулятора представлен на рис.2. В данной работе для моделирования использован инкрементный нечёткий регулятор, на входе которого оставлены только зависимости приращения управляющей величины от ошибки регулирования и ее производных (без интегрального члена). В фаззи-регуляторах при формулировке нечетких правил эксперт может сформулировать зависимость управляющей величины от величины производной, но не может - от величины интеграла, поскольку интеграл «запоминает» всю предысторию изменения ошибки, которую человек помнить не может.

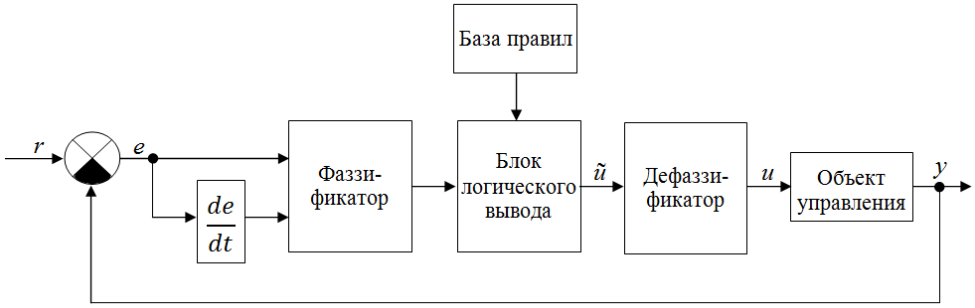


Рис. 1. Структура нечеткого регулятора

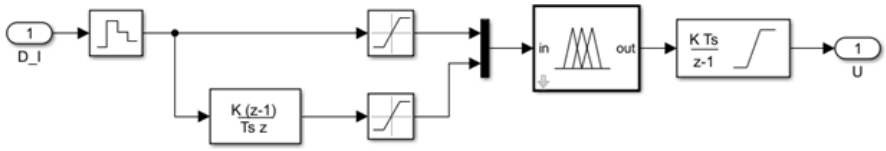


Рис. 2. Блок-схема реализации нечеткого регулятора в Matlab/Simulink

На выходе из нечёткого логического контроллера выходит сигнал производной управляющего воздействия, который затем интегрируется в дискретном интеграторе с тем же временем дискретизации, что и в блоке Zero-OrderHold. [3]

Диапазон выходных значений *dU*/*dt* примем равным [-20;20].

Диапазон возможных значений ошибки по току – [$-I_{\text{ном}}$; $I_{\text{ном}}$].

Диапазон возможных значений производной по времени ошибки по току – [-1000; 1000].

Для нечетких множеств существует общепринятая система обозначений отклонений или уровней: N – отрицательный (*Negative*); *Z* – нулевой (*Zero*); *P* – положительный (*Positive*).

К этим обозначениям добавляют буквы *S* (малый, *Small*), *M* (средний, *Medium*), *L* (большой, *Large*). Например, *NL* – отрицательный большой.

В данной работе используется разделение входных и выходных переменных на 7 термов: *NL*, *NM*, *NS*, *Z*, *PS*, *PM*, *PL*, в пределах каждого из которых строится функция принадлежности переменной $\mu(e)$ каждому из множеств. Были приняты функции принадлежности треугольной формы.

Для выполнения функции регулирования над нечеткими переменными должны быть выполнены операции, построенные на основании высказываний оператора, сформулированных в виде нечетких правил. Совокупность нечетких правил и нечетких переменных используется для осуществления нечеткого логического вывода, результатом которого является управляющее воздействие на объект управления. Для рассматриваемого объекта была составлена база правил, сведенная в табл.2, переведенная для автоматизации расчетов в числовую форму.

Таблица 2

База правил нечёткого логического вывода в численной форме

dU/dt			Величина ошибки, Δ*I*						
			<-- -			0	+ -->		
			LN	*MN*	*SN*	*Z*	*SP*	*MP*	*LP*
Производная ошибки, *d(ΔI)/dt*	^	*LN*	1	1	1	3	3	4	5
	¦	*MN*	1	1	2	3	4	4	5
	'	*SN*	1	2	3	4	4	5	5
	0	*Z*	1	2	3	4	4	5	6
	+	*SP*	1	3	4	4	5	6	6
	¦	*MP*	1	3	4	5	5	6	7
	v	*LP*	1	3	4	5	6	7	7

На рис. 3 представлены результаты моделирования.

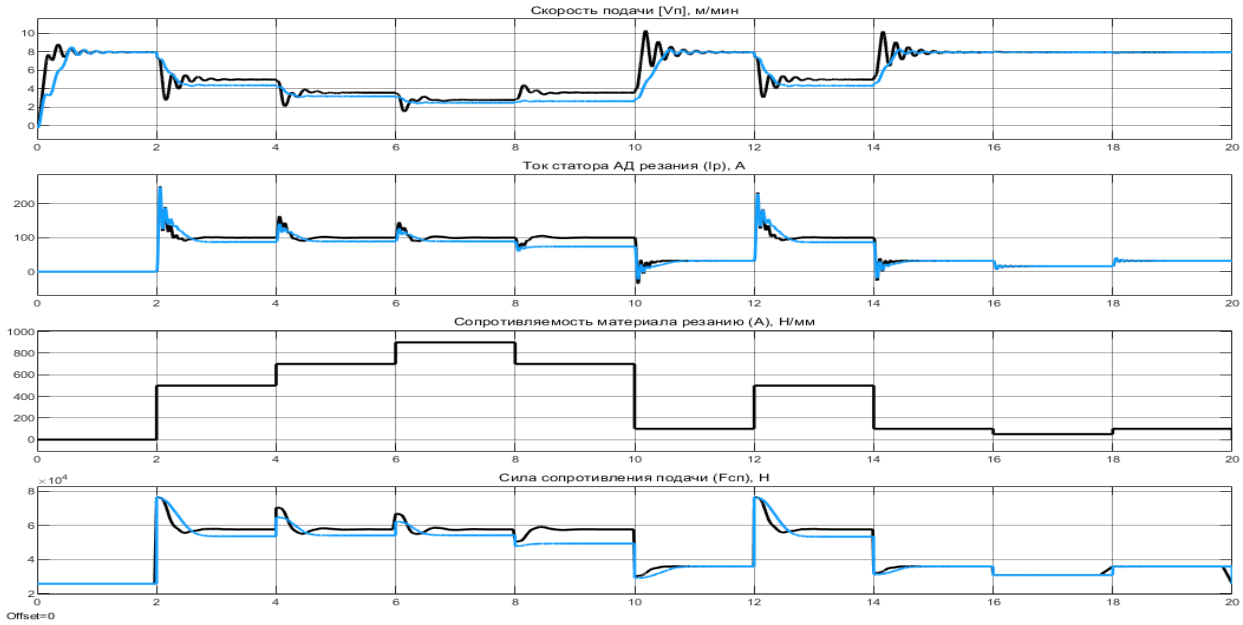


Рис. 3. Динамика основных параметров модели с ПИД-регулятором (черный) и нечетким регулятором (синий)

Сравнение качества переходного процесса при работе двух регуляторов: обычного ПИ-регулятора с постоянными коэффициентами, и нечеткого ПИ-регулятора показывает, что нечеткий регулятор позволит повысить быстродействие регулятора нагрузки в среднем от 1,5 до 3 раз по сравнению с классическим регулятором, а значит избежать критических перегрузок и возможной поломки механических частей в трансмиссии очистного комбайна при внезапной увеличении крепости угля в результате встречи его исполнительного органа с твердым включением.

Список литературы

1. Морозов В.И., Чуденков В.И., Сурина Н.В. Очистные комбайны: Справочник / Под общей ред. В.И. Морозова. М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2006. 650 с.

2. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic part. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1974. 121(12). P. 1585-1588.

3. Кузнецов А.В., Макарьянц Г.М. Синтез нечёткого регулятора при помощи пакета прикладных программ системы Matlab: методическое пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2016. 59 с.

Шпрехер Дмитрий Маркович, д-р. техн. наук, профессор, shpreher-d@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский Государственный Университет,

Зеленков Александр Вадимович, ассистент, sashazelnkv@mail.ru, Россия, Тула, Тульский Государственный Университет

CONTROL THE PRODUCTION PROCESS FROM ADAPTATION TO THE VARIETIES OF ROCKS

D.M. Shprekher, A.V. Zelenkov

A promising method for controlling the electric drive of a shearer based on the use of a fuzzy logic device is considered. A database of fuzzy inference rules in numerical form was developed and simulation modeling was performed in the MATLAB/Simulink environment in order to compare the studied and classical control scheme based on the PI control law.

Key words: shearer, maximum current, moving speed, fuzzy logic.

Shprekher Dmitry Markovich, doctor of technical science, professor, shpreher-d@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Zelenkov Alexandr Vadimovich, assistant, sashazelnkv@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.45.018.5

ПОВЫШЕНИЕ МЕЖРЕМОНТНОГО РЕСУРСА ЛОПАТОК ТУРБИН НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

В.М. Костив, Т.Е. Помигалова, А.Н. Джабаев, А.С. Штин

Приводится рекомендации по разработке конструктивных мероприятий по обеспечению выработки межремонтного ресурса рабочих лопаток турбины высокого давления на основе исследований их напряженно-деформированного состояния. Исследование состояния рабочий лопаток выполнялось в лицензионной версии универсальной программной системы конечно-элементного (МКЭ) анализа ANSYS.

Ключевые слова: рабочие лопатки турбин, газотурбинные двигатели, конечно-элементный анализ, межремонтный ресурс, лопатки высокого давления.

Усовершенствование производства и ремонта судовых двигателей является актуальным и востребованным, как для уже эксплуатируемых двигателей, так и для перспективных, находящихся в стадии проектирования. Основными элементами газотурбинного двигателя (ГТД), влияющими на межремонтный ресурс, являются: комплектующие камеры сгорания (как правило, это жаровые трубы и пламя перебрасывающие патрубки), подшипники качения, скольжения, применяемые при компоновке ГТД, и элементы горячей части свободной турбины, к которым относятся сопловые лопатки (статорная часть), и рабочие лопатки (роторная часть).

Компрессорные станции ПАО «Газпром» комплектуются также ГТД производства ГП НПКГ «Зоря - Машпроект», такими как ДР-59, ДЖ-59, ДГ90, ДН80, ДУ80. В двигателях ДР-59 и ДЖ-59 применяются двухступенчатые свободные турбины высокого давления (ТВД) и низкого давления (ТНД) с небандажированными рабочими лопатками. В двигателях ДГ90, ДН80 и ДУ80 применяются одноступенчатые свободные турбины с бандажированными рабочими лопатками, которые в сравнении с двухступенатыми турбинами, воспринимают большие силовые и температурные нагрузки. В процессе эксплуатации судовых двигателей в составе компрессорных станций газотранспортной системы ПАО «Газпром» производства ГП НПКГ «Зоря - Машпроект», одной из имеющихся проблем является обрыв бандажных полок рабочих лопаток одноступенчатых турбин высокого давления, что влечет за собой преждевременный съем двигателя с эксплуатации и его направление в ремонт для восстановления его работоспособности и приведения его тактико-технических характеристик в соответствие с техническими условиями на поставку.

Рассмотрим существующую проблему на примере двигателей ДГ90, поступающих в ремонт на специализированное ремонтное предприятие публичное акционерное общество «Тюменские моторостроители» (ПАО «ТМ»).

Как видно из рис. 1-3, обрыв бандажных полок начинается с радиуса перехода входной кромки в бандажную полку. Поверхности спинки обеих лопаток вблизи полок и далее до выходной кромки окислены до синего и темно-серого цвета, имеют сколы керамического слоя (рис. 2, 3). Таким образом, сложной и ответственной технической задачей является определение и снижение критических напряжений в указанной проблемной области, являющихся одним из ключевых негативных факторов, влияющих на прочность.

Для оценки напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов рабочей лопатки О90048305 была использована рабочая электронная модель детали (ЭМД) выше указанной лопатки, стоящая на учете и используемая в ПАО «ТМ». Данная ЭМД является верифицированной и используется для написания программ для станков с ЧПУ, разработки технологической оснастки и для проведения контроля готовых

лопаток с использованием контрольно-измерительных машин (КИМ) и 3D сканеров ATOS. Расчет напряжений в ЭМД рабочей лопатки выполнялся в универсальной программной системе конечно-элементного анализа Ansys.

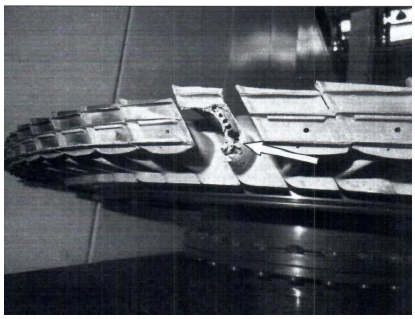


Рис. 1. Обрыв бандажной полки, сильное оплавление, разрушение рабочей лопатки ротора ТВД (отсутствие передней части бандажной полки)

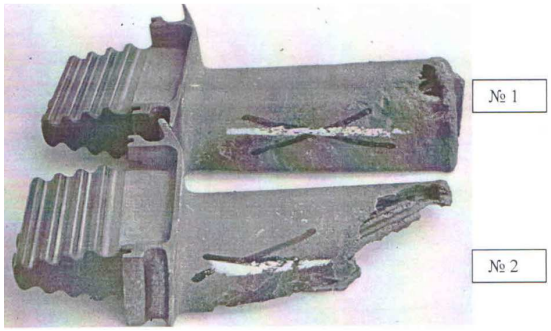


Рис. 2. Вид лопаток ротора ТВД О90048305 со стороны спинки: №1 – со сквозным выгоранием материала в зоне спинки и входной кромки вблизи бандажной полки и входной кромки; №2 – с выгоранием материала и обрывом части пера так же со стороны бандажной полки

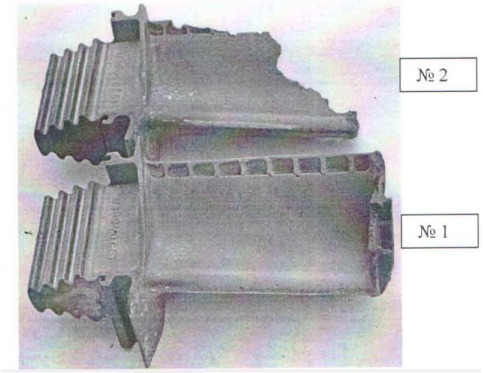


Рис. 3. Вид лопаток ротора ТВД О90048305 со стороны корыта

Для проведения прочностных расчетов рабочей лопатки действующей конструкции, а также варианта с доработанной бандажной полкой рабочей лопатки турбины высокого давления, была выполнена доработка имеющейся конструкции в программном обеспечении (ПО) SolidWorks. Для каждой из моделей лопаток построена периодическая область обтекания рабочего колеса (РК).

Граничные условия на входе и выходе получены инженерными методиками расчета с применением законов газовой термодинамики. Параметры работы рабочего колеса взяты из технической документации газотурбинного двигателя.

Физико-механические свойства материала моделей лопаток получены из открытых работ Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ).

Получение температуры и давления на наружных поверхностях рабочих лопаток выполнялось посредством моделирования построенных периодических областей РК в ПО Ansys модуле Fluent. Температура на внутренних поверхностях вихревых матриц лопаток определялась с помощью инженерных методик [1-4] и в данной работе рассматривается, как средне распределенная величина.

Полученные данные температурных распределений на поверхностях лопаток используются для расчета распределения температуры в телах лопаток. Учет теплоотвода от лопаток в диск РК осуществляется посредством выреза сегмента диска турбины высокого давления. Термодинамическое моделирование распределения температуры в лопатках выполнено в ПО Ansys модуле Steadystatethermal [5-6].

После получения данных распределения давлений на наружных поверхностях лопаток, а также температуры в телах лопаток, производится прочностной расчет. В расчете применяются: силы давления на поверхности лопатки, распределения температуры в теле лопатки, а также учитывается центробежная нагрузка. Моделирование прочностных свойств выполнено в ПО Ansys в модуле StaticStructural [7].

Расчет проводился для номинального режима работы двигателя с мощностью на выходном валу 16 МВт.

Анализ работ предшественников [8, 9], а также результатов расчета, представленных на рис. 4-6 показывает, что в существующей бандажной полке максимальные напряжения приближаются к пределу прочности материала, что существенно снижает запас прочности.

С целью снижения максимальных напряжений [10] в выше указанных областях были проведены изменения геометрии бандажной полки путем ее усечения (рис. 7-9).

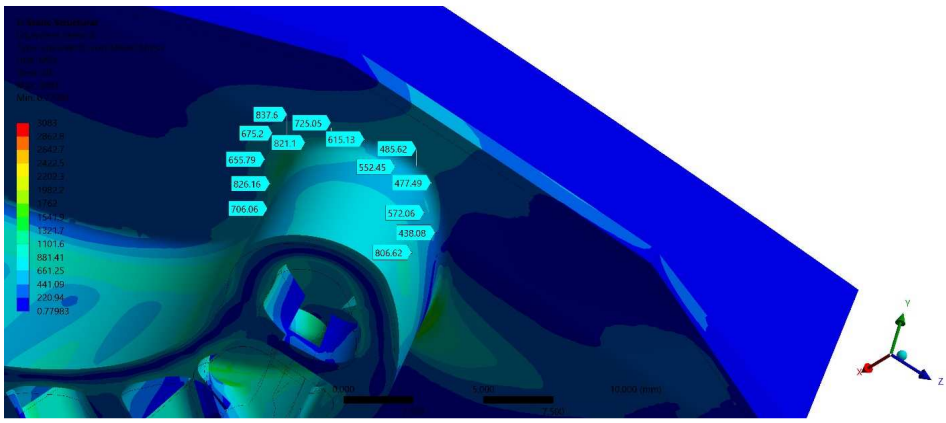


Рис. 4. Картина изолиний напряжений в радиусе перехода входной кромки в бандажную полку (существующая бандажная полка)

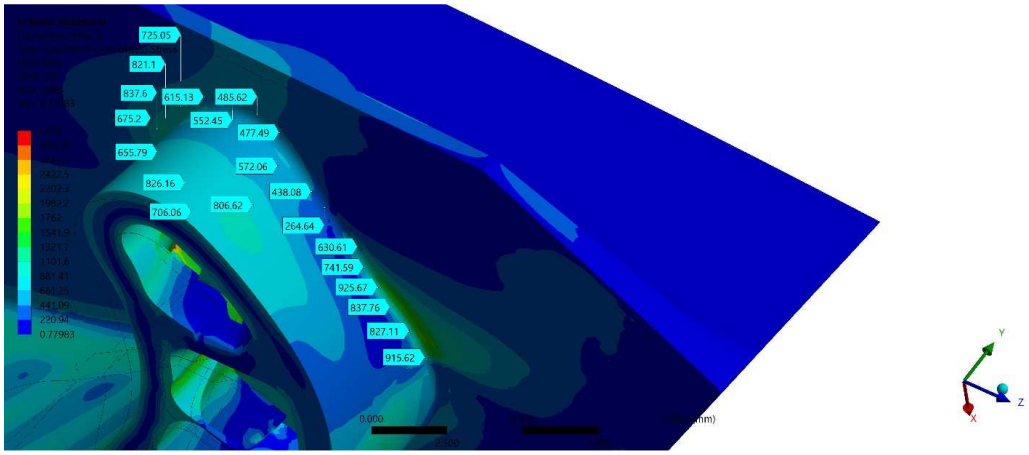


Рис. 5. Картина изолиний напряжений в радиусе перехода спинки, в бандажную полку со стороны входной кромки (существующая бандажная полка)

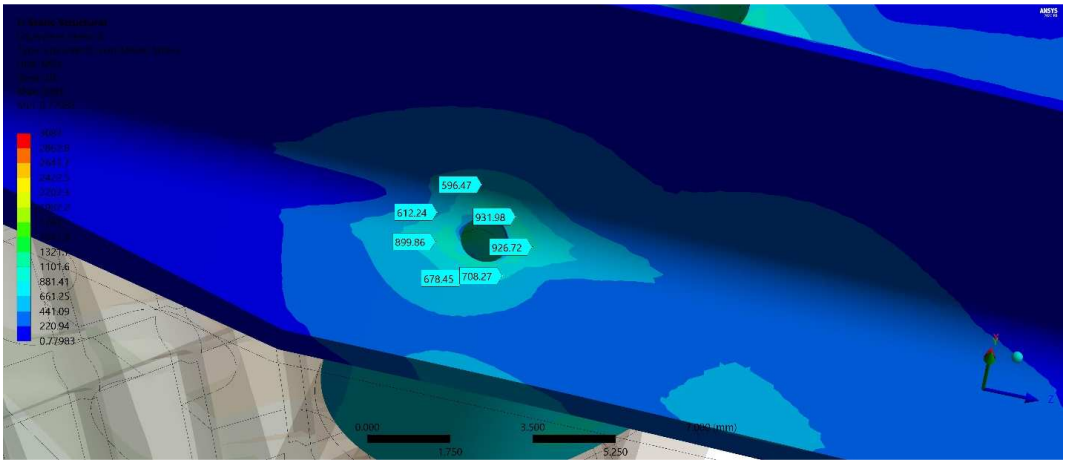


Рис. 6. Картина изолиний напряжений в отверстии системы охлаждения бандажной полки со стороны входной кромки (существующая бандажная полка)

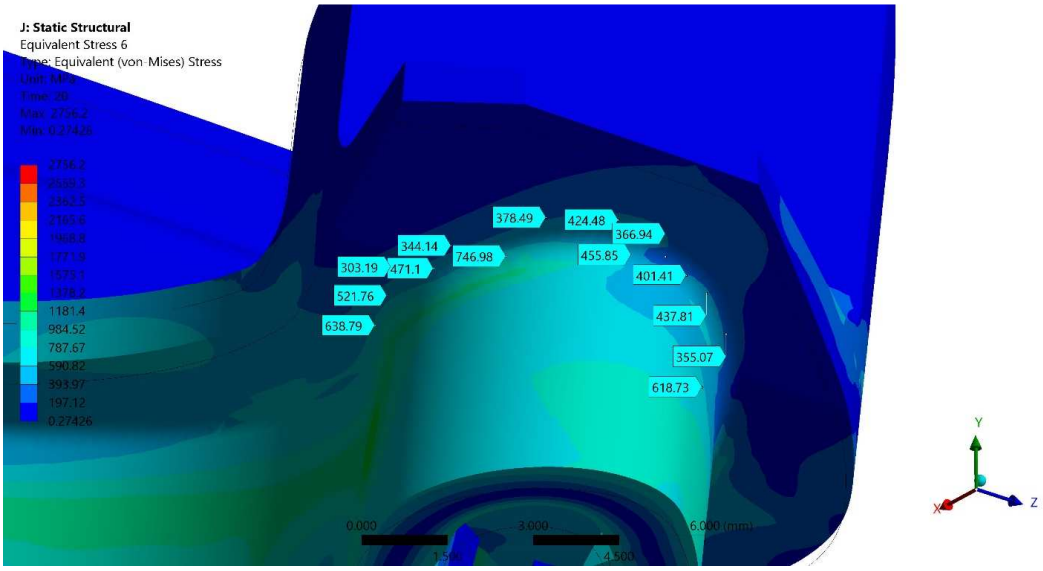


Рис. 7. Картина изолиний напряжений в радиусе перехода входной кромки в бандажную полку (усеченная бандажная полка)

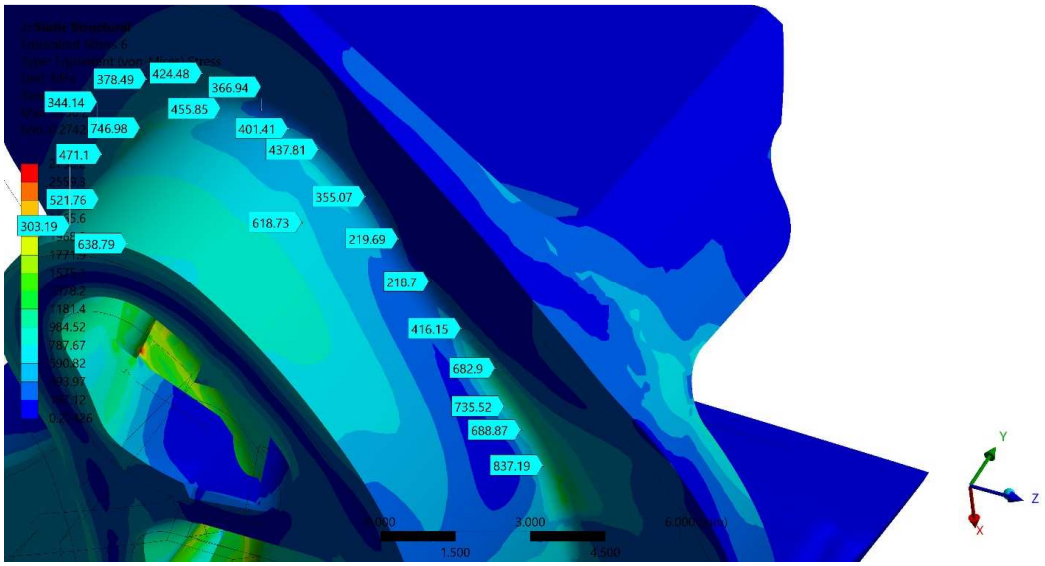


Рис. 8. Картина изолиний напряжений в радиусе перехода спинки в бандажную полку со стороны входной кромки (усеченная бандажная полка)

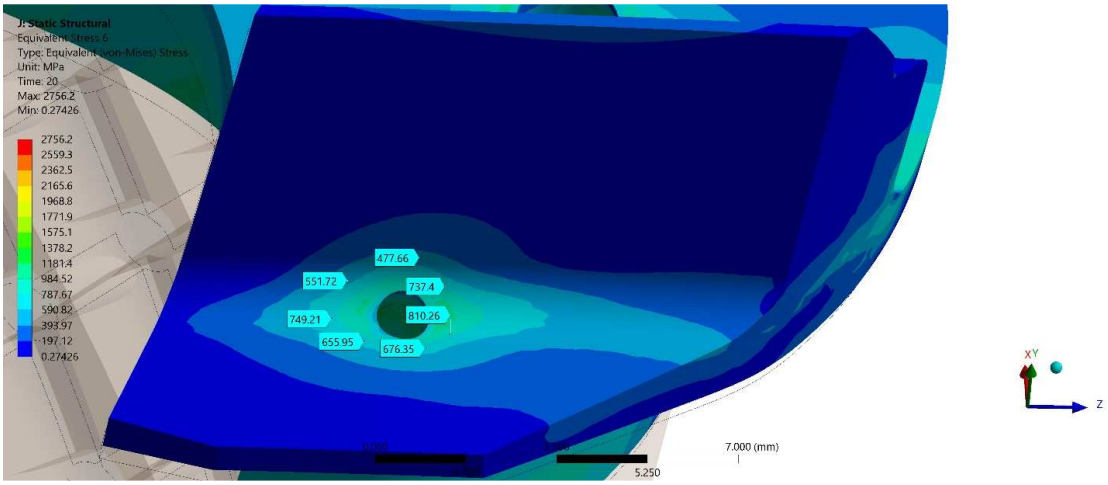


Рис. 9. Картина изолиний напряжений в отверстии системы охлаждения бандажной полки со стороны входной кромки (усеченная бандажная полка)

Величины напряжений, полученные при расчете напряженно-деформированного состояния, сведены в таблицу.

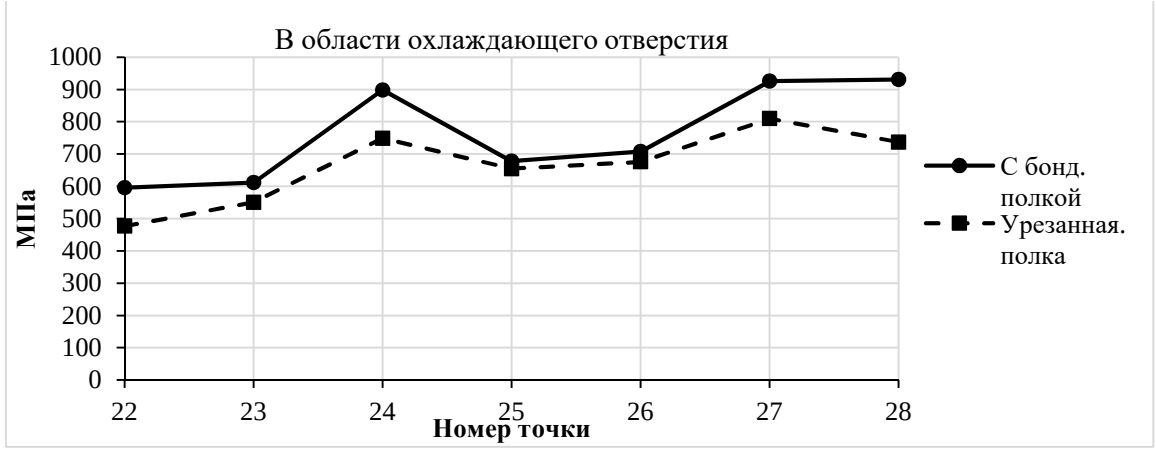
На основании табличных данных построены графики зависимостей напряжений по контрольным точкам для двух вариантов исполнения бандажной полки.

Величины напряжений в бандажной полке

№ п/п	Напряжения в бандажной полке, МПа		Разница напряжений, МПа
	существующей	усеченной	
На переходе пера лопатки в бандажную полку			
1	706	638	68
2	826	521	305
3	655	303	352
4	675	471	204
5	837	344	493
6	821	746	75
7	725	378	347
8	615	424	191
9	552	455	97
10	185	366	-181
11	477	401	76
12	572	437	135
13	438	355	83
14	806	618	188
15	264	219	45
16	630	218	412
17	741	416	325
18	925	682	243
19	837	735	102
20	827	688	139
21	915	837	78
В области охлаждающего отверстия			
22	596	477	119
23	612	551	61
24	899	749	150
25	678	655	23
26	708	676	32
27	926	810	116
28	931	737	194



а



б

Рис. 10. Распределение напряжений в бандажной полке по контрольным точкам для двух вариантов ее исполнения: а – с бандажной полкой; б – с усеченной бандажной полкой

Анализ эпюр распределения напряжений в критичных зонах рабочей лопатки с усеченной бандажной полкой показал снижение опасных напряжения по сравнению с напряжениями, возникающими при работе лопатки с стандартной полкой, что приводит к увеличению запаса прочности.

Таким образом, усечение бандажной полки приводит к увеличению запаса прочности критических мест, а, следовательно, и к обеспечению выработки межремонтного ресурса рабочих лопаток О90048305.

На основании проведенных исследований предлагается повышение межремонтного ресурса рабочих лопаток одноступенчатых турбин высокого давления путем увеличения их прочности следующими конструктивными изменениями:

1. Изменением конструкции бандажной полки, с целью уменьшения массы самой бандажной полки. Данный способ потребует лишь изменение литейной оснастки, применяемой при отливке заготовки, и не потребует изменения конструктивного исполнения системы уплотнения (предназначенной для уменьшения перетечек рабочего тела по зазору между ротором и статором в радиальном направлении).

2. Изменением конструктивного исполнения рабочей лопатки ТВД, исключающим применение бандажной полки. Это, в свою очередь, снизит не только массу лопатки, но и уменьшит силовое воздействие, оказываемое центробежными силами на замковую часть, как лопатки, так и диска. Данный способ потребует изменения не только литейной оснастки, применяемой при отливке заготовки, но и потребует изменения

системы уплотнения, заключающегося в изменении конструктивного исполнения сегментов сотового уплотнения, объединяющих в себе и функцию формирования проточной части.

Список литературы

1. Ле Т.З., Нестеренко В.Г. Исследование и оптимизации теплового состояния и уровня допустимых напряжений в бандажных полках рабочих лопаток турбин газогенераторов высокотемпературных авиационных ГТД // Труды МАИ. 2018. № 102. 29 с.

2. Ле Т.З., Нестеренко В.Г, Нестеренко В.В., Матушкин А.А. Особенности проектирования охлаждаемых лопаток высокотемпературных турбин ВРД с бандажной полкой // Авиадвигатели XXI века: сборник тезисов докладов Всероссийской научно-технической конференции. М.: Изд-во ЦИАМ, 2015. С. 309.

3. Ле Т.З., Нестеренко В.Г. Методика проектирования профильной части бандажированных лопаток ротора турбины высокого давления ГТД // Научно-технический Вестник Поволжья. 2017. №4. С. 54-57.

4. Ле Т.З., Нестеренко В.Г. Особенности проектирования охлаждаемых лопаток высокотемпературных турбин высокого давления с бандажной полкой // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. №1 (67). С. 84-89.

5. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Ansys Inc. release 17.0. 2016. 626 p.

6. ANSYS FLUENT Theory Guide. Ansys Inc. release 17.0. 2016. 814 p.

7. ANSYS CFX Documentation. URL: https://www.sharcnetca/ Software/Ansys/17.0/enus/help/ ai_smfo/cfx_intro.html (дата обращения: 10.02.2020).

8. Васильев Б.Е., Магеррамова Л.А. Анализ влияния конфигурации бандажных полок лопаток турбин перспективных двигателей на прочностные характеристики // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2015. № 3 (69). С. 28-32.

9. Магеррамова ЛА. Конструктивные мероприятия, направленные на увеличение расчетной долговечности лопаток высокотемпературных турбин // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2015. № 2 (68). С. 79-86.

10. Матвеев В.Н, Батурин О.В, Попов Г.М., Горячкин Е.С. Оптимизация рабочего процесса многоступенчатых осевых турбин с бандажными полками // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2015. Т. 14. № 3-2. С. 271-283.

Костив Владимир Михайлович, канд. техн. наук, главный контролер, kostiv.vladimir@mail.ru, Россия, Тюмень, ПАО «Тюменские моторостроители»,

Помигалова Татьяна Евгеньевна, канд. техн. наук, доцент, Tatyana_Pomigalova@mail.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет,

Джабаев Александр Надырович, руководитель группы перспективных разработок, alexanderdgabaev@gmail.com, Россия, Тюмень, Тюменский ремонтно-механический завод АО «Транснефть – Сибирь»,

Штин Антон Сергеевич, ассистент, shtin_as@mail.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет

INCREASE OF TURBINE BLADES OVERHAUL LIFE BASED ON INVESTIGATION OF THEIR STRESS-STRAIN STATE

V.M. Kostiv, T.E. Pomigalova, A.N. Dzhabayev, A.S. Shtin

This article provides recommendations for the development of structural measures to ensure the development of the overhaul life of high-pressure turbine rotor blades based on studies of their stress-strain state. Examination of the state of the rotor blades was carried out in the licensed version of the ANSYS universal software system of finite element (FEA) analysis.

Key words: turbine rotor blades, gas turbine engines, finite element analysis, overhaul life, high pressure blades.

Kostiv Vladimir Mikhailovich, candidate of technical sciences, chief controller, kostiv.vladimir@mail.ru, Russia, Tyumen, PJSC «Tyumen Motor Builders»,

Pomigalova Tatiana Evgenievna, candidate of technical sciences, docent, Tatyana_Pomigalova@mail.ru, Russia, Tyumen, Tyumen Industrial University,

Dzhabayev Alexander Nadyrovich, man-made groups perspective developments, alexanderdgabaev@gmail.com, Russia, Tyumen, Tyumen Mechanical-repair Plant JSC Transneft — Siberia,

Shtin Anton Sergeevich, assistant, shtin_as@mail.ru, Russia, Tyumen, Tyumen Industrial University

УДК 62-192

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАКОНА ФИШЕРА–ТИППЕТА 2-ГО ПОРЯДКА ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОВОКУПНОСТИ СРЕДНЕВЗВЕШЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ВЫБОРОЧНЫМ ДАННЫМ В ИНТЕРВАЛЕ НОРМАТИВНЫХ НАГРУЗОК

А.А. Котесов, А.А. Котесова

Статья посвящена определению параметров закона Фишера-Типпета 2-го порядка для совокупности по выборочным данным средневзвешенных напряжений. Произведен анализ ранее разработанных методик определения параметров закона Фишера-Типпета для совокупности. Приведено краткое описание и определены основные недостатки. Поставлена задача разработки методики, позволяющей производить определение параметров совокупности путем корректировки всех параметров выборочного распределения. Выполнен вывод зависимостей параметров выборки и совокупности от вероятности, в итоге на основе данных выражений получена система уравнений. Разработан алгоритм определения параметров закона Фишера-Типпета с тремя параметрами для совокупности по выборочным данным при заданных значениях крайних членов совокупности, который позволяет получить параметры совокупности путем корректировки всех параметров выборочного распределения.

Ключевые слова: средневзвешенное напряжение, выборка, совокупность, надежность, усталостный ресурс, параметры, закон Фишера-Типпета, металлоконструкция.

При прогнозировании усталостного ресурса и для обоснования допускаемых напряжения по критерию сопротивления усталости рекомендуется использовать вероятностное распределение совокупности эксплуатационных нагрузок. Данные об эксплуатационных нагрузках получают при натурных испытаниях масштабированных моделей, проведением тензометрирования опытных образцов техники, с помощью численного моделирования. Количество статистической информации можно увеличить, используя

ранее полученные данные при испытаниях других подобных машин и механизмов. Но сбор такого количества информации проблематичен и требует определенных затрат времени и материальных средств. Поэтому возникает необходимость определения параметров совокупности по имеющимся выборочным данным.

Вопросами обеспечения надежности машин занимались многие ученые, в частности вопросы определения исходных данных для вероятностных расчетов элементов машин на усталость отражены в работах Н.С. Стрелецкого, А.Р. Ржаницина, В.В. Болотина, В.В. Вержбицкого, А Фрейденталя, С.В. Серенсена, В.П. Когаева, В.И. Брауде, В.В. Болотина, В.Е. Касьянова, В.М. Труханова, И.А. Хозяева, В.Г. Ананина, В.П. Жарова, Д.М. Беленького, Л.М. Грошева, В.С. Исакова, О.А. Полушкина и других ученых.

Материалы и методы. В своих работах Касьянов В.Е. одной из причин наступления ранних (преждевременных) отказов машин считает ошибки репрезентативности выборок использованных при расчетах ресурса. Использование в расчетах выборочных вероятностных распределений вместо распределения генеральной совокупности, приводит к завышению значений прочности и ресурса и при этом занижает действующие нагрузки, вызывая преждевременные отказы.

Поэтому для уточнения расчетов в работах В.Е. Касьянова, и его учеников Топилина И.В., Дудниковой В.В., Роговенко Т.Н., Зайцевой М.М., Котесовой А.А., Тепляковой С.В. и других предлагается производить определение параметров вероятностных законов для совокупности по выборочным данным с помощью различных аналитических методик. [1 - 10]

В результате анализа ранее разработанных методик определения параметров вероятностного закона Фишера-Типпета 2-го порядка (Капура-Ламберсона 3-го типа) [1-1] для совокупности по выборочным данным было определено, что основным недостатком рассмотренных методик является корректировка только одного параметра трехпараметрического закона при переходе от выборки к совокупности. Предполагается замена параметра сдвига выборочного распределения - c на параметр сдвига совокупности - C, а остальные параметры масштаба - A и формы - B принимаются равными параметрам выборочного распределения A = a, B = b (рис. 1 (2)).

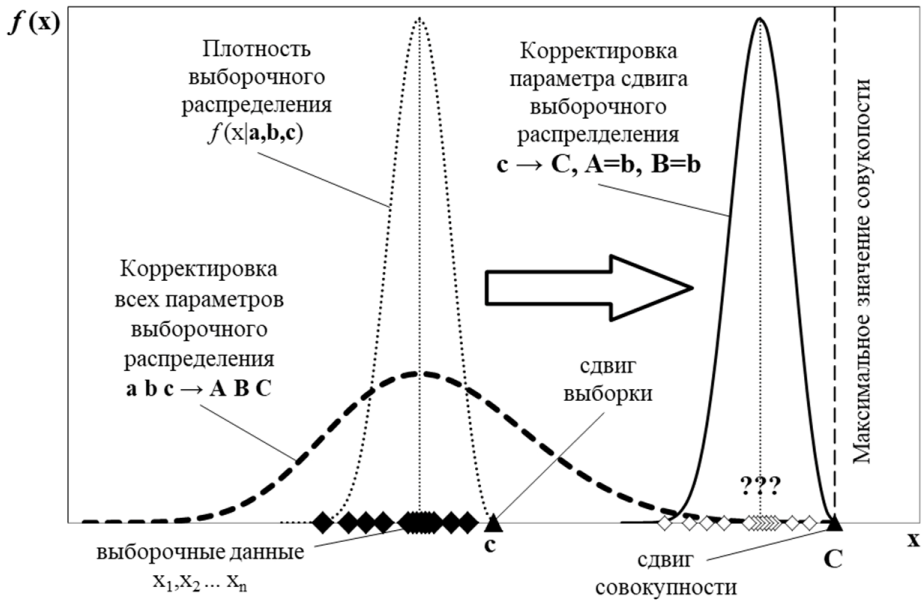


Рис. 1. Схема получения распределения совокупности путем корректировки параметров закона Фишера-Типпета 2-го порядка выборочного распределения

При этом происходит смещение распределения на величину разности параметров сдвига выборки и совокупности, а форма кривой распределения не меняется, и значения выборочных оказываются в области маловероятных значений, что не совсем

корректно. Поэтому при определении параметров совокупности по выборочным данным необходимо производить корректировку всех параметров вероятностных законов выборочного распределения.

Таким образом, возникает необходимость разработки методики определения параметров вероятностных законов Вейбулла и Фишера-Типпета 2-го порядка (Капура-Ламберсона 3-го типа) для совокупности по выборочным данным, путем корректировки всех параметров выборочного распределения.

Для решения поставленной задачи разработана методика определения параметров закона Фишера-Типпета 2-го порядка для совокупности средневзвешенных напряжений по выборочным данным.

Совокупность в данном случае представляет собой интервал возможных значений средневзвешенных напряжений в зависимости от конструктивных особенностей проектируемой машины и эксплуатационных нагрузок с учетом динамики и внешних воздействий.

Значения не входящие в данный интервал считаются ненормативными (нерасчетными) (рис. 2).

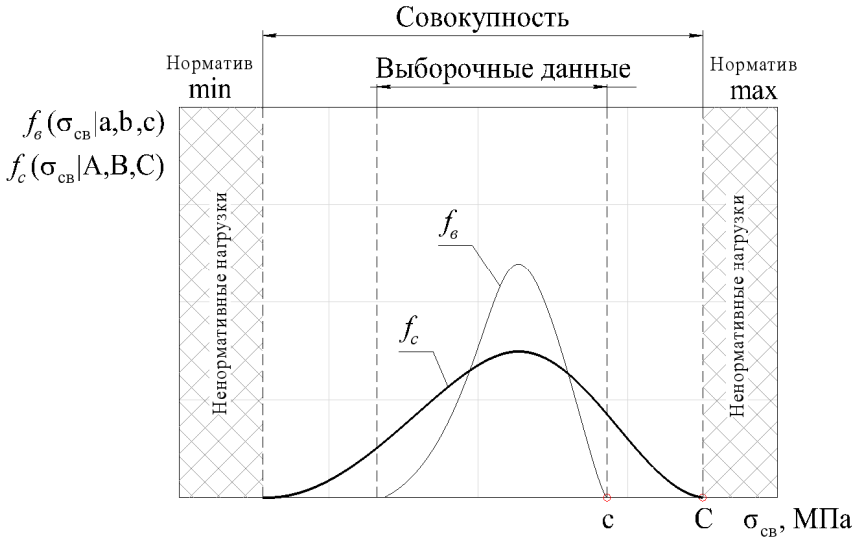


Рис. 2. Схема плотности распределения по закону Фишера-Типпета 2-го порядка для совокупности f_c и выборки $f_в$ средневзвешенных напряжений в интервале значений нормативных нагрузок

Вероятностный закон Фишера-Типпета 2-го порядка (Капура-Ламберсона 3-го типа для максимальных значений) представляет собой инвертированный закон Вейбулла с тремя параметрами. Поэтому максимальное нормативное значение средневзвешенного напряжения будет рассматриваться как наиболее вероятное, а наименьшее нормативное значение как наименее вероятное (обозначим: X_{1c} – минимальное и X_{Nc} – максимальное значения совокупности).

Аппроксимируем данные трехпараметрическим законом Фишера-Типпета 2-го порядка с параметрами a, b, c и плотностью распределения:

$$f(x|a,b,c)=\frac{b}{a}\left(\frac{c-x}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{c-x}{a}\right)^{b}} \quad (1)$$

После чего получаем выражение для определения абсциссы аппроксимирующей кривой в зависимости от γ:

$$x_\gamma = c - a\sqrt[b]{-\ln\left(\frac{\gamma}{100\%}\right)}. \quad (2)$$

Дополним данное выражение условием:

$$x_\gamma = \begin{cases} c - ab\sqrt{-\ln\left(\dfrac{\gamma}{100\%}\right)}, & при \quad X_{Nc} < c - ab\sqrt{-\ln\left(\dfrac{\gamma}{100\%}\right)} < X_{1c} \\ X_{1c}, & при \quad c - ab\sqrt{-\ln\left(\dfrac{\gamma}{100\%}\right)} > X_{1c} \\ X_{Nc}, & при \quad c - ab\sqrt{-\ln\left(\dfrac{\gamma}{100\%}\right)} < X_{Nc} \end{cases} \tag{3}$$

Определим гамма-процентные выборочные значения $x_{\gamma\,min}$ и $x_{\gamma\,max}$ с помощью выражений:

$$x_{\gamma\min} = c - ab\sqrt{-\ln\left(1 - \frac{\gamma}{100\%}\right)} \tag{4}$$

$$x_{\gamma\max} = c - ab\sqrt{-\ln\left(\frac{\gamma}{100\%}\right)} \tag{5}$$

Для значений X_{1c} и X_{Nc} выражения (4), (5) запишем следующим образом с использование параметров совокупности A, B, C

$$X_{1c} = C - AB\sqrt{-\ln\left(1 - \frac{\gamma}{100\%}\right)}; \tag{6}$$

$$X_{Nc} = C - AB\sqrt{-\ln\left(\frac{\gamma}{100\%}\right)}. \tag{7}$$

Перезапишем полученные выражения (4) – (7) в следующем виде:

$$\left(\frac{c - x_{\gamma\min}}{a}\right)^b = -\ln\left(1 - \frac{\gamma}{100\%}\right),$$

$$\left(\frac{c - x_{\gamma\max}}{a}\right)^b = -\ln\left(\frac{\gamma}{100\%}\right),$$

$$\left(\frac{C - X_{1c}}{A}\right)^B = -\ln\left(1 - \frac{\gamma}{100\%}\right),$$

$$\left(\frac{C - X_{Nc}}{A}\right)^B = -\ln\left(\frac{\gamma}{100\%}\right).$$

Очевидно, что имеют место выражения:

$$\left(\frac{c - x_{\gamma\min}}{a}\right)^b = \left(\frac{C - X_{1c}}{A}\right)^B, \tag{8}$$

$$\left(\frac{c - x_{\gamma\max}}{a}\right)^b = \left(\frac{C - X_{Nc}}{A}\right)^B. \tag{9}$$

В качестве дополнительного условия, для корректировки распределения, добавим условие равенства мод:

$$c-a\left(\frac{b-1}{b}\right)^{\frac{1}{b}}=C-A\left(\frac{B-1}{B}\right)^{\frac{1}{B}} \quad (10)$$

Используя выражения (8) – (10), получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases}\left(\dfrac{c-x_{\gamma\min}}{a}\right)^{b}=\left(\dfrac{C-X_{1c}}{A}\right)^{B},\\ \left(\dfrac{c-x_{\gamma\max}}{a}\right)^{b}=\left(\dfrac{C-X_{Nc}}{A}\right)^{B},\\ c-a\left(\dfrac{b-1}{b}\right)^{\frac{1}{b}}=C-A\left(\dfrac{B-1}{B}\right)^{\frac{1}{B}}.\end{cases} \quad (11)$$

Результаты исследования. На основании вышеизложенного, разработан алгоритм определения параметров закона Фишера-Типпета 2-го порядка с тремя параметрами для вероятностного распределения совокупности по выборочным данным, при заданных значениях крайних членов совокупности, представленный на рисунке 2.

В итоге гамма-процентное значение совокупности будет определяться через выражение:

$$X_{\gamma}=C-A\sqrt[B]{-\ln\left(\frac{\gamma}{100\%}\right)} \quad (12)$$

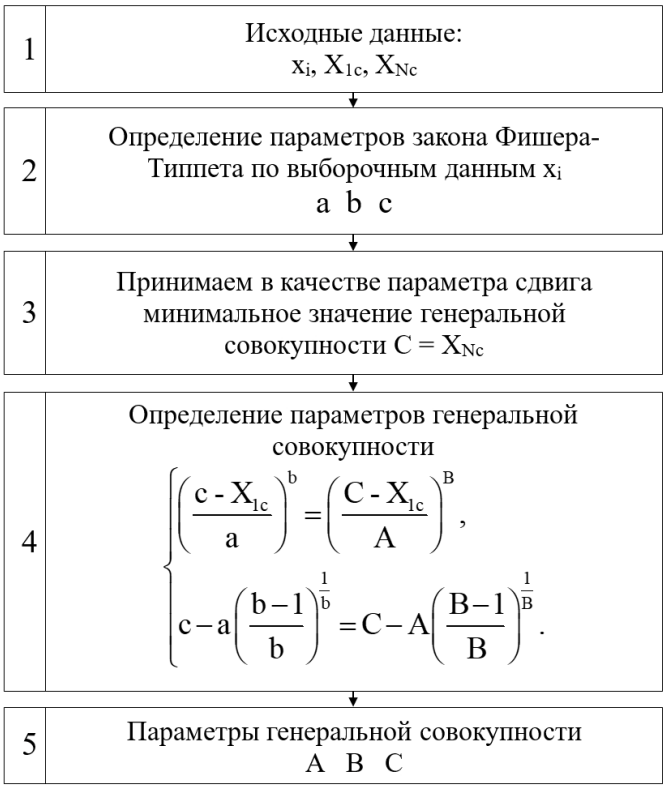


Рис. 2. Алгоритм определения параметров закона Фишера-Типпета с тремя параметрами для совокупности по выборочным данным при заданных значениях крайних членов совокупности: x_i – варианты выборки; X_{1c} – минимальное и X_{Nc} – максимальное значения совокупности; a,b,c – параметры закона Фишера-Типпета для выборочных данных; A,B,C – параметры закона Фишера-Типпета для совокупности

Вывод. Таким образом, разработана методика, которая позволяет производить определение параметров закона Фишера-Типпета 2-го порядка для вероятностного распределения совокупности по выборочным данным при заданных значениях крайних членов совокупности с корректировкой всех параметров выборочного распределения. Данную методику рекомендуется использовать для определения параметров вероятностного распределения совокупности средневзвешенных напряжений характеризующих типовой процесс нагружения по выборочным данным в интервале нормативных нагрузок.

Список литературы

1. Расчетно-экспериментальное определение гамма-процентного ресурса стрелы одноковшового экскаватора для генеральной совокупности конечного объема / Касьянов В.Е., Зайцева М.М., Котесова А.А. [и др.] // Инженерный вестник Дона. 2012. № 1 (19). С. 45–50.

2. К вопросу о методе расчета усталостного гамма-процентного ресурса / Котесова А.А., Косенко В.В., Евсеев Д.З. [и др.] // В сборнике: строительство и архитектура-2017. Дорожно-транспортный факультет Материалы научно-практической конференции. Министерство образования и науки; Донской государственный технический университет, Академия строительства и архитектуры. 2017. С. 87-91.

3. Исследование эксплуатационной надежности автомобилей при замене параметра сдвига распределения ресурса деталей закона Вейбулла / Касьянов В.Е., Косенко Е.Е., Косенко В.В. [и др.] // Качество и жизнь. 2018. № 3 (19). С. 65-69.

4. Анализ соотношения сдвигов и крайних членов совокупностей и выборок по ресурсу и прочности / Теплякова С.В., Котесова А.А., Копылов Ф.С., Крымский В.С. // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4 (51). С. 170.

5. Касьянов В.Е., Теплякова С.В., Котесов А.А. Применение генеральной совокупности конечного объема вместо выборочных данных в расчетах усталостного ресурса деталей машин // Научное обозрение. 2014. № 9-2. С. 395-398

6. Kotesova A.A., Teplyakova S.V., Popov S.I., Kopylov F.C. Ensuring assigned fatigue gamma percentage of the components // International Scientific Conference «Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development»: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 698. DOI:10.1088/1757-899X/698/ 6/ 066029.

7. Котесова А.А., Котесов А.А., Котова С.В., Уджуху А.З. Аналитическое определение параметров распределения Вейбулла для совокупности конечного объема по твердостиспользуеми стали // Новые технологии. 2012. № 4. С. 56-61.

8. Котесов А.А. Аналитическое определение параметров закона Вейбулла для генеральной совокупности конечного объема по выборочным данным прочности стали // Materiály VIII mezinárodní vědecko - praktická konference «Přední vědecké novinky - 2012». Díl 11. Technické vědy. Tělovýchova a sport: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o - 88 stran.

9. Касьянов В.Е., Зайцева М.М., Котесова А.А., Котесов А.А. Оценка параметров распределения Вейбулла для совокупности конечного объема // Депонированная рукопись. № 21-В2012 24.01.2012.

10. Котесов А.А. Проверка метода для определения параметров трехпараметрического распределения Вейбулла генеральной совокупности конечного объема по выборочным данным // Известия Ростовского государственного строительного университета. 2012. № 16. С. 152.

Котесов Анатолий Анатольевич, ассистент, voodoo-doll@yandex.ru, Россия, Ростов-на-Дону, Донской государственный технический университет,

Котесова Анастасия Александровна, канд. техн. наук, доцент, a.kotesova@mail.ru, Россия, Ростов-на-Дону, Донской государственный технический университет

METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF THE FISHER-TIPPETT LAW OF THE 2ND ORDER FOR THE DISTRIBUTION OF A SET OF WEIGHTED AVERAGE STRESSES ON SAMPLE DATA IN THE RANGE OF STANDARD LOADS

A.A. Kotesov, A.A. Kotesova

Recommendations are given for the development of constructive measures to ensure the development of the overhaul life of the high-pressure turbine rotor blades on the basis of studies of their stress-strain state. The study of the state of the rotor blades was carried out in the licensed version of the ANSYS universal software system for finite element (FEM) analysis.

Key words: turbine rotor blades, gas turbine engines, finite element analysis, overhaul life, high pressure blades.

Kotesov Anatoly Anatolievich, assistant, voodoo-doll@yandex.ru, Russia, Rostov-on-don, Don State Technical University,

Kotesova Anastasia Alexandrovna, candidate of technical sciences, docent, voodoo-doll@yandex.ru, Russia, Rostov-on-don, Don State Technical University

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 629.052.6

АВТОНОМНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

К.Ю. Нечепуренко

В статье рассмотрен способ определения положения в пространстве малогабаритного беспилотного летательного аппарата с использованием алгоритма распознавания ArUco-маркеров компьютерным зрением.

Ключевые слова: системы компьютерного зрения, ориентация объекта, модель камеры с точечной диафрагмой, ArUco-маркеры, БПЛА.

Важность развития технологий для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) переоценить невозможно. Задачи, которые ставятся перед БПЛА, обусловлены их многочисленными приложениями как в военной, так и в гражданской сферах.

В настоящее время в мире производится широкий ряд БПЛА, от тяжелых до сверхмалых [1], и создание надежных систем навигации этих аппаратов является важным направлением разработок. Существует много проблем, связанных с управлением и навигацией БПЛА. В частности, стабильность полета большинства из них существенно зависит от качества сигналов спутниковой связи GPS/ГЛОНАСС. Однако использование подобных технологий позиционирования может быть затруднено или вообще невозможно. Работа таких систем может быть нарушена в результате целенаправленного подавления либо из-за технических неполадок. Сигнал GPS/ГЛОНАСС может оказаться недоступным из-за рельефа местности или городских зданий, а также внутри помещений. Использование GPS/ГЛОНАСС может быть неприемлемым по причине секретности или недостаточной точности. Поэтому создание автономной системы позиционирования, которая позволила бы БПЛА меньше зависеть (или вообще отказаться) от спутниковой навигации, является актуальной, перспективной и важной научно-технической задачей.

Одним из подходов к решению данной задачи является создание системы определения положения и ориентации на основе компьютерного зрения.

Компьютерное зрение (иначе техническое зрение) — теория и технология создания машин, которые могут производить обнаружение, отслеживание и классификацию объектов.

Как научная дисциплина, компьютерное зрение относится к теории и технологии создания искусственных систем, которые получают информацию из изображений.

Основными компонентами системы машинного зрения являются [2]:

Чувствительный элемент – датчики и сенсоры, для получения изображения;

Встроенный процессор или ПК для получения и обработки информации;

Программное обеспечение, для обработки изображений в соответствии с поставленной задачей;

Каналы связи для передачи полученных результатов;

Любые источники света.

Чувствительный элемент (камера) захватывает изображение, после, устройство, которое преобразует данные с камеры, передает их в память ПК, где изображение обрабатывается с помощью различных алгоритмов, заданных в программном обеспечении, соответствующего поставленной задаче (рис. 1).

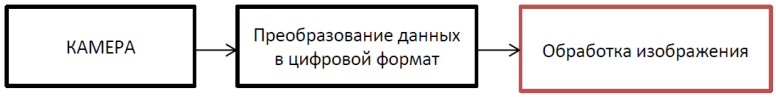


Рис. 1. Принцип работы компьютерного зрения

В зависимости от выбора системы отсчёта выделяют два подхода для отслеживания положения:

Outside-in подход подразумевает присутствие неподвижного внешнего наблюдателя (камера), определяющего положение движущегося объекта по характерным точкам. Используется в OculusRift (Constrellation), PSVR, OSVR и множестве MotionCapture систем.

Inside-out подход предполагает наличие на движущемся объекте оптического сенсора, благодаря которому возможно отслеживать движение относительно неподвижных точек в окружающем пространстве. Используется в MicrosoftHololens, ProjectTango (SLAM), SteamVRLighthouse (гибридный вариант, т.к. есть базовые станции).

Также в зависимости от наличия специальных оптических маркеров выделяют отдельно:

Безмаркерный трекинг как правило строится на сложных алгоритмах с использованием двух и более камер, либо стерео камер с сенсорами глубины.

Трекинг с использованием маркеров предполагает заранее заданную модель объекта, которую можно отслеживать даже с одной камерой. Маркерами обычно служат источники инфракрасного излучения (как активные, так и пассивные), а также видимые маркеры наподобие QR-кодов. Такой вид трекинга возможен только в пределах прямой видимости маркера.

Для обеспечения автономности летательного аппарата целесообразно размещать систему целиком на борту (т.е. использовать подход inside-out (см. выше). Трекинг без использования маркеров предполагает обработку большого массива данных, что требует наличия мощной вычислительной системы на борту. Таким образом, на сегодняшний день наибольший интерес представляет подход с использованием маркеров.

В теории маркером может быть любая фигура (объект). Но на практике мы ограничены разрешением камеры, особенностями цветопередачи, освещения и вычислительной мощностью оборудования (все ведь происходит в реальном времени, а потому должно делаться быстро), а потому выбирается обычно черно-белый маркер простой формы. Как правило это прямоугольник или квадрат со вписанным во внутрь идентификатором-образом.

Наиболее распространённой библиотекой компьютерного зрения является OpenCV [3]. Основные типы маркеров в ней выглядят так (рис. 2).

Алгоритм распознавания маркеров. Алгоритм распознавания маркеров включает в себя несколько этапов. Для каждого этапа существует множество методов осуществления. Остановимся на рассмотрении методов, которые были выбраны для обеспечения наилучшей работоспособности с имеющимся аппаратным обеспечением.

Преобразование изображения к черно-белой цветовой схеме. Преобразование изображения к черно-белой цветовой схеме при помощи вычисления среднего значения цветовых составляющих каждого пикселя:

$$GS = \frac{(R+G+B)}{3}.$$

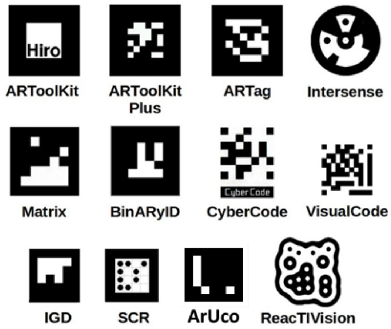


Рис. 2. Основные типы маркеров с названиями

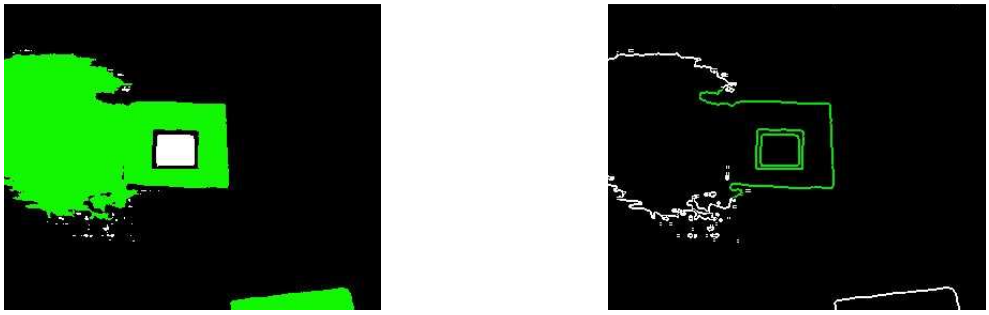
Бинаризация изображения. Бинаризация изображения - перевод в двухцветное состояние.

Чаще всего используются методы на основе локальной адаптации. Методов бинаризации около сорока, наиболее качественного результата удалось достигнуть с использованием адаптивного метода.

Определение замкнутых областей. На бинаризованом изображении необходимо определить замкнутые области на белом фоне. Это делают двумя способами:

последовательными операциями заливки белых областей и выделением замкнутых контуров (рис. 3, а)

сначала выделяются контуры, а затем выбираются из них замкнутые (рис. 3, б).



а ***б***

Рис. 3. Выделение замкнутых областей на белом фоне: а – 1-й способ; б – 2-й способ

Выделение контура. После определения замкнутых областей на изображении выделяются контуры. В данном случае применялся алгоритм Собеля.

Выделение углов маркера. Выделив контур, его необходимо сопоставить с маркером. Может быть выделено много разных контуров на изображении, необходимо найти что-то «похожее» на четырехугольник.

Для решения этой задачи можно применить алгоритм Дугласа-Пекера (он же алгоритм Рамера-Дугласа-Пекера, алгоритм итеративной ближайшей точки, алгоритм разбиения и слияния), позволяющий уменьшить число точек кривой, аппроксимированной большей серией точек.

Например, в openCV есть функция approxPolyDP, которая реализует алгоритм Дугласа-Пекера. Если ее результат дополнительно обработать, то получится вполне подходящий результат.

Связь с системой координат. Стороны квадрата параллельны осям координат. Зная положение углов маркера и его размеры, можно по его проекции на матрице камеры судить о его положении и расстоянии до него. Если использовать квадрат с чистым внутренним полем в качестве маркера, то его угол поворота можно определить лишь в пределах 90 градусов, поэтому маркеры чаще всего имеют внутреннюю структуру.

Для наглядности рассмотрим работу алгоритма распознавания на примере конкретного изображения (рис. 4).

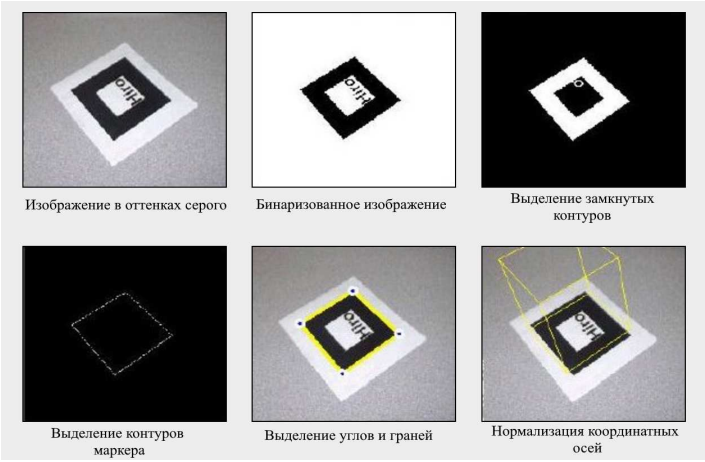


Рис. 4. Представление работы алгоритма распознавания маркера

Математическая модель камеры. Для 3D-реконструкции объектов в библиотеке компьютерного зрения openCV используется так называемая модель камеры с точечной диафрагмой (рис. 5) [4]. В этой модели сцена формируется путем проецирования трехмерных точек на плоскость изображения с использованием преобразования перспективы.

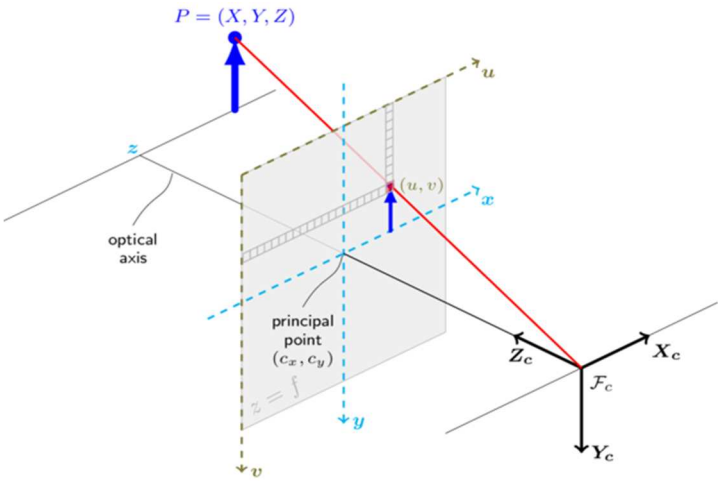


Рис. 5. Графическое представление модели камеры с точечной диафрагмой

X,Y,Z – координаты точки в мировой системе координат; u, v – координаты проекции точки в пикселях на матрице; c_x, c_y – основная точка, обычно находящаяся в центре изображения; f_x, f_y – фокусные расстояния, выраженные в пиксельных единицах.

Таким образом, если изображение с камеры масштабируется с каким-то коэффициентом, то все эти параметры должны тоже умножаться на этот коэффициент. Матрица внутренних параметров не зависит от просматриваемой сцены и после одного вычисления ее можно использовать повторно, пока фокусное расстояние неизменно (в случае объектива с увеличением).

Уравнение перспективной проекции выглядит так:

$$-u = f\frac{x}{z},$$

где f_x – фокусное расстояние, выраженное в пиксельных единицах.

Если учесть, что обычно главная оптическая ось не проходит через центр матрицы, то к предыдущему выражению можно добавить поправочный коэффициент c:

$$-u = f\frac{x}{z} + c.$$

Также следует учесть, что из-за технологической погрешности изготовления матрицы, пиксели могут иметь не строго квадратную, а прямоугольную форму:

$$f_x = s_x f;\ f_y = s_y f,$$

где s_x, s_y–коэффициенты формы пикселя.

Введем дополнительные обозначения:

$$x' = \frac{x}{z};\ y' = \frac{y}{z}.$$

Тогда уравнения перспективной проекции запишутся:

$$u = f_x * x' + c_x;\quad v = f_y * y' + c_y$$

Для удобства данные уравнения можно переписать в матричном виде:

$$Q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}; q = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};\quad q = \frac{1}{z} AQ,$$

где Q – координаты точки во внешней системе координат, q –координаты проекции точки, A – матрица проекции (или матрица внутренних параметров)

Реальные линзы обычно имеют некоторые искажения: в основном радиальные и тангенциальные (рис. 6). Тогда необходима коррекция:

$$x'' = x' \frac{1+k_1 r^2+k_2 r^4+k_3 r^6}{1+k_4 r^2+k_5 r^4+k_6 r^6} + 2p_1 x' y' + p_2(r^2 + 2x'^2);$$

$$y'' = y' \frac{1+k_1 r^2+k_2 r^4+k_3 r^6}{1+k_4 r^2+k_5 r^4+k_6 r^6} + p_1\left(r^2 + 2y'^2\right) + 2p_2 x' y',$$

где $r^2 = x'^2 + y'^2$; $u = f_x * x'' + c_x$; $v = f_y * y'' + c_y$; $k_1, \dots, k_6$ – радиальные коэффициенты искажения, p_1, p_2 – тангенциальные коэффициенты искажения.

На практике коэффициенты *k*3-*k*6 и тангенциальные коэффициенты оказывают малое влияние, поэтому можно их исключить из модели. Тогда получаем:

$$\lambda = 1 + k_1 r^2 + k_2 r^4;\ q = \frac{1}{z} \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} AQ.$$



Рис. 6. Графическое представление изображений с искажениями $k_1 = 0$, $k_1 > 0$, $k_1 < 0$ соответственно

Коэффициенты искажения не зависят от просматриваемой сцены. Таким образом, они также относятся к внутренним параметрам камеры. И они остаются неизменными независимо от разрешения снятого изображения. Если, например, камера была откалибрована на изображениях с разрешением 320 x 240, абсолютно одинаковые коэффициенты искажения могут быть использованы для изображений 640 x 480 с одной и той же камеры, в то время как f_x, f_y, c_x и c_y необходимо соответствующим образом масштабировать.

Совмещенная матрица вращения-перемещения $[R|t]$ называется матрицей внешних параметров. Она используется для описания движения камеры вокруг статической сцены и наоборот, движения объекта перед неподвижной камерой. То есть $[R|t]$ переводит координаты точки (*X*,*Y*,*Z*) в систему координат, фиксированную относительно камеры. Преобразование выше эквивалентно следующему (когда $z \neq 0$)

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + T.$$

Вращение описывается углами Эйлера.

Углы Эйлера определяют три поворота системы, которые позволяют привести любое положение системы к текущему. Обозначим начальную систему координат как (*x*,*y*,*z*), конечную как (*X*,*Y*,*Z*). Пересечение координатных плоскостей *xy* и *XY* называется линией узлов *N* (рис. 18).

Угол α между осью *x* и линией узлов – угол прецессии,

Угол β между осями *z* и *Z*–угол нутации,

Угол γ между осью *X* и линией узлов - угол собственного вращения.

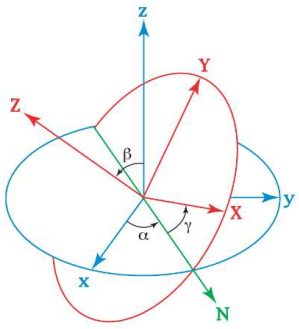


Рис. 7. Углы Эйлера

Углы Эйлера описывают последовательную комбинацию пассивных поворотов вокруг осей вращающейся системы координат. Матрицы этих поворотов имеют вид:

$$R_z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \; R_x(\beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta) & -sin(\beta) \\ 0 & \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix};$$

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Чтобы получить координаты точки в системе координат, фиксированной относительно камеры необходимо умножить координаты на матрицу вращения *R*:

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = R_z(\alpha)R_x(\beta)R_z(\gamma).$$

Если начала двух систем координат смещены друг относительно друга, необходимо еще добавить смещение. Матрица смещения *T*:

$$T = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix};$$

t_1, t_2,t_3 – компоненты вектора смещения камеры относительно требуемой системы координат для координат *X*, *Y*, *Z* соответственно.

С учетом поворота и смещения получаем:

$$q = \frac{1}{z}\begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} AR(Q+T); \; \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z}\begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Зная положение камеры и точки отсчета, можно нарисовать проекцию для 3D модели. В данном случае куба. Как видно, если использовать квадрат с чистым полем в качестве маркера, то он симметричен, и распознать вращение можно только лишь частично. Иногда этого достаточно. Если же нет — то можно внести внутрь квадрата дополнительный рисунок, он будет выглядеть, например, так (рис. 8).

Платформа для реализации. В качестве платформы для реализации оптико-электронной системы ориентации для малогабаритного ЛА выбран одноплатный микрокомпьютер *Raspberry pi3B*, сочетающий компактные размеры и достаточно мощное аппаратное обеспечение.

Критически-важным элементом разрабатываемой системы является видеокамера. Была выбрана *RPiCamera (G)* – это камера с линзой и регулируемым фокусом для одноплатного компьютера *RaspberryPi,* имеющая широкий угол обзора и высокое разрешение матрицы.

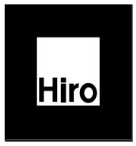


Рис. 8. Маркер, позволяющий определить угол поворота

Разработка компьютерного алгоритма. На языке программирования *Python* с использованием библиотеки машинного зрения *OpenCV* написано программное обеспечение, позволяющее отслеживать положение камеры в системе координат, связанной с центром маркера.

Координаты маркеров в используемой системе координат считаются известными. Для простоты использования системы маркеры предполагается располагать на любых вертикальных и горизонтальных поверхностях. Т.о., для каждого из маркеров одна из осей системы координат будет коллинеарна одной из осей комнатной системы.

Тогда получение координат камеры в глобальной (комнатной) СК сводится к двумерному повороту со сдвигом на координаты маркера.

Для улучшения точности позиционирования программное обеспечение имеет возможность работы сразу с несколькими маркерами одновременно.

Получим формулы для преобразования. Пусть на плоскости заданы две системы координат, имеющие общее начало *O*: система *Oxy* (старая) и система *OXY* (новая), которая получена поворотом старой системы на угол α. Это значит, что угол (*Ox^OX*)=(*Oy^OY*)=α (рис. 9).

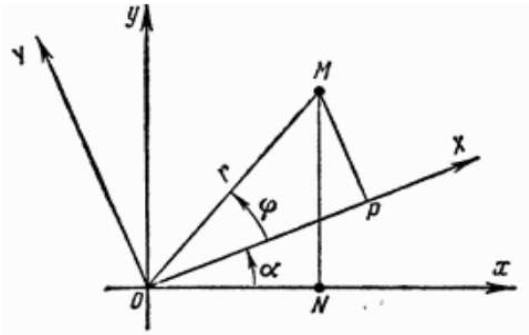


Рис. 9. Системы координат Oxy (старая) и OXY (новая)

Введем полярные координаты: старые – с полярной осью, совпадающей с осью *Ox*, и новые – с полярной осью, совпадающей с осью *Oy*. Пусть точка *M* в новой полярной системе имеет полярный угол φ и полярный радиус *r*. В старой полярной системе полярный угол точки *M* будет равен α+φ, а полярный радиус будет таким же, как и в новой системе.

Тогда можно записать выражения:

$$x = rcos(\alpha + \varphi);\ y = rsin(\alpha + \varphi).$$

Используя тригонометрические тождества для косинуса и синуса суммы двух углов получаем:

$$x = r\big(cos(\alpha)cos(\varphi) - sin(\alpha)sin(\varphi)\big);\quad y = r\big(sin(\alpha)cos(\varphi) + cos(\alpha)sin(\varphi)\big).$$

Так как $rcos(\varphi) = X,\ rsin(\varphi) = Y$ получаем:

$$x = Xcos(\alpha) - Ysin(\alpha);\quad y = Xsin(\alpha) + Ycos(\alpha).$$

Окно вывода программы представлено на рис. 10.

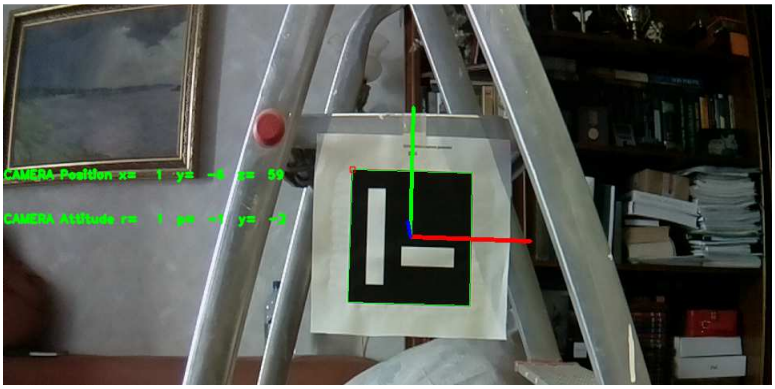


Рис. 10. Окно вывода программы (линиями обозначены координатные оси; Cameraposition – координаты камеры; Cameraattitude – углы расположения камеры)

Далее были проведены измерения статической точности системы. В помещении, с размещёнными на различных поверхностях маркерами, система размещалась в различных точках и измерялось ее реальное положение. Результаты измерений и показания системы представлены в таблице.

Результаты оценки статической точности

Результат работы программы				**Реальные измерения**			**Отклонение**		
№ изм.	X, см	Y, см	Z, см	X, см	Y, см	Z, см	X, см	Y,см	Z, см
1	211	98	233	207	94	239	4	4	6
2	53	114	173	52	116	170	1	2	3
3	283	94	130	277	90	143	6	4	13
4	56	105	235	67	115	233	11	10	2
5	225	83	192	240	74	188	15	9	4
6	37	45	207	29	42	190	8	3	17
7	117	45	140	105	33	123	12	12	17
8	250	115	130	243	113	137	7	2	7

Другие параметры						
В % соотн.	СКО X	СКО У	СКО Z	Среднее арифметическое отклонение		
	4,5355	3,9551	6,1629	X, см	Y, см	Z, см
	0,0294	0,0452	0,0342	8,00	5,75	8,625

Согласно результатам эксперимента, точность системы лежит в приемлемых границах (в техническом задании ставилась цель получение отклонения в пределах 10 см).

Следующим этапом работы были проведены расчеты динамической точности системы. Система определения положения работает циклично, то есть новый кадр изображения получается с камеры только после того, как обработан предыдущий и вычислены координаты. Таким образом, если система установлена на подвижном объекте, то в то время, пока производятся вычисления, объект смещается на некоторое расстояние. Это расстояние и будет образовывать динамическую ошибку системы.

Динамическая ошибка (рис. 13) будет складываться из нескольких составляющих: возникающая от задержки на обработку изображения (зависит от разрешения видеопотока, рис. 11) и возникающая от вычисления координат (зависит от числа маркеров в кадре, рис. 12).

Если допустить, что за время анализа изображения и вычисления координат ЛА движется равномерно и прямолинейно, то легко можно представить зависимость величины динамической ошибки от скорости движения.

Таким образом, максимальная скорость движения ла, при которой он не выйдет за пределы требований по точности приблизительно 0,5 м/с при разрешении 640 х 480 и 0,3 м/с при разрешении 960 х 720, что в условиях помещения является вполне приемлемым показателем.

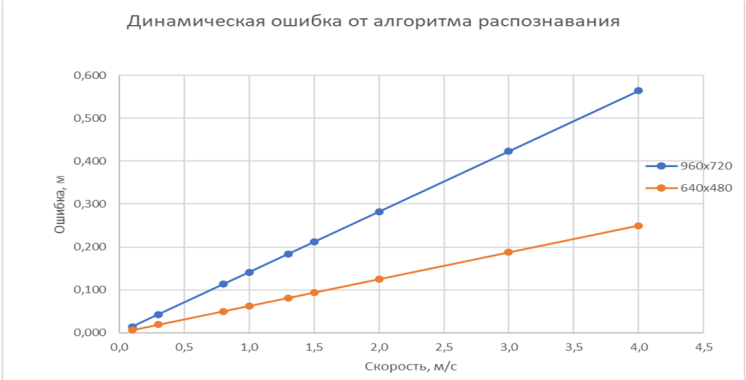


Рис. 11. Динамическая ошибка, возникающая вследствие задержки, вызванной выполнением алгоритма распознавания маркера

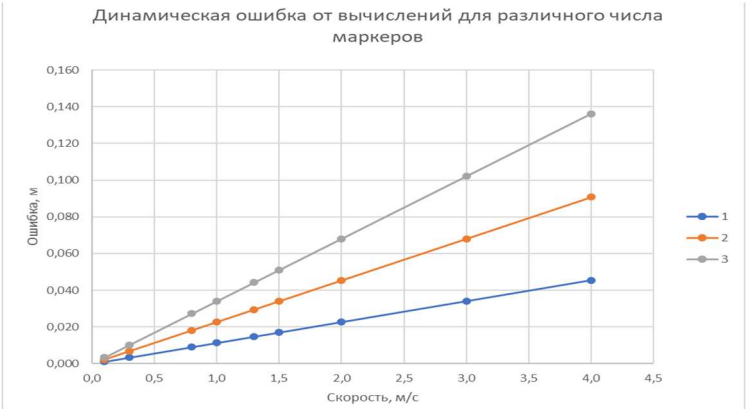


Рис. 12. Динамическая ошибка, возникающая вследствие задержки, вызванной пересчетом координат для каждого из маркеров

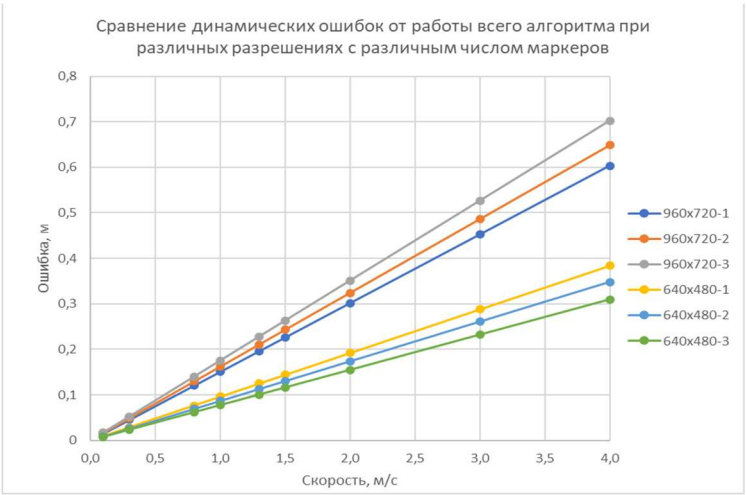


Рис. 13. График возникающих в системе динамических ошибок при разных параметрах работы

Выводы. Представлено пошаговое описание работы алгоритма распознавания маркера. Рассмотрена математическая модель камеры, используемой данным алгоритмом.

Разработана программа, позволяющая определить координаты камеры в глобальной (комнатной) системе координат опираясь на маркеры. Проведена оценка статической точности работы разрабатываемой системы. Проведена оценка динамической точности, исходя из которой, сделан вывод о максимальной скорости объекта, на который может устанавливаться система.

Рассмотренный в данной работе способ определения положения в пространстве можно использовать для решения проблемы навигации малогабаритных ЛА в условия отсутствия сигнала спутниковых навигационных систем.

Список литературы

1. Фимушкин В.С., Чуканов К.П. Беспилотные управляемые летательные аппараты. Справочноаналитический обзор. (БЛА – 2016). Тула: Издание АО «КБП», 2016.

2. Компьютерное зрение // Википедия. [2010—2019]. Дата обновления: 22.12.2019. [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/?oldid=104091078 (дата обращения: 22.12.2019).

3. Techtrends // Машинное зрение. [Электронный ресурс] URL: http://www.techtrends.ru/techdept/techarticles/sistemy_tehnicheskogo_zreniya.php (дата обращения: 20.04.2017).

4. Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV. -GB. O'Reilly Media, 2008, 576 p. OpenCV // Camera Calibration and 3D Reconstruction [Электронный ресурс] URL: https://docs.opencv.org/2.4/ modules/ calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html (дата обращения: 09.04.2020).

Нечепуренко Константин Юрьевич, аспирант, kod9797@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

AUTONOMOUS LOCALIZATION
OF THE UNMANNED AERIAL VEHICLE

K.Y. Nechepurenko

The article discusses a method for determining the position in space of a small-sized unmanned aerial vehicle using the algorithm for recognizing ArUco markers by computer vision.

Key words: computer vision systems, object orientation, pinhole camera model, ArUco markers, UAV.

Nechepurenko Konstantin Yurievich, postgraduate, kod9797@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

УДК 62-503.54

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

С.В. Феофилов, А.В. Козырь

В работе рассматривается проблема поиска структуры и оптимизации параметров цифровых автоколебательных систем управления с разрывным управлением. Дискретизация сигналов в таких системах приводит к существенным отличиям от аналогового случая, что не позволяет использовать известную классическую теорию релейных систем управления (РСУ). Предлагается методика синтеза цифровой системы управления, учитывающая дискретную реализацию уже на этапе оптимизации параметров регулятора. Приведен пример синтеза конкретной цифровой системы управления техническим объектом, демонстрирующий преимущества используемого подхода по сравнению с существующими методами.

Ключевые слова: цифровая автоколебательная система управление, реле, синтез, фазовый годограф релейной системы.

Современные системы управления всегда стремятся проектировать так, чтобы они были оптимальными по заданному критерию качества. Из теории управления известно, что оптимальное управление в большинстве случаев является разрывным, часто релейным. Релейный закон управления всегда обеспечивает максимально возможный входной сигнал (положительный или отрицательный) для объекта управления. Известно, что производительность РСУ, во многих случаях лучше, чем непрерывное управление [1]. В настоящее время системы автоматического управления реализованы на цифровых контроллерах или программируемых логических матрицах (FPGA). Это приводит к дискретизации сигналов по времени и уровню и вызывает значительные различия в работе по сравнению с непрерывным случаем. Таким образом, актуальной задачей является исследование динамики и разработка новых методов синтеза цифровых систем с релейным управлением. Использование классических методов, разработанных для аналоговых систем невозможно из-за существенных различий при цифровой реализации. Как показывает работа [2], общей теории для указанного класса систем в настоящее время не существует.

При исследовании симметричных периодических процессов в образцах релейных систем используются методы описания функции (DF) [2 – 4]. Однако такие методы являются приблизительными и не позволяют провести полный анализ цифровых RCS. Известны работы, основанные на дискретном аналоге метода Цыпкина [5, 6]. Методы, основанные на годографе Цыпкина, позволяют точно определять все возможные периодические движения в дискретной РСУ с линейным объектом. Известен подход, сочетающий в себе метод Цыпкина и метод описывающей функции, который называется методом годографа возмущенной релейной системы управления [3, 4]. Такой подход позволяет точно определять параметры периодических движений в РСУ с линейным объектом, прост в использовании и позволяет синтез таких систем. Основным ограничением этого метода является его применение только к системам с линейным объектом, хотя большинство объектов, исследуемых в инженерной практике являются нелинейными. Релейные системы управления широко используются в высокоточных системах позиционирования и слежения. В таких системах важно обеспечить минимальную ошибку отслеживания входного сигнала и фазовую задержку в частотном диапазоне работы системы.

Основными задачами при проектировании РСУ с цифровым управлением являются: определение возможных периодических движений (исследование [1 – 4]), для дискретного случая (исследование [2, 3]), определение устойчивости колебаний

(исследование [1]) для дискретного случая (исследование [3]), определение точности режима слежения за входным сигналом на основе линеаризации (исследование [4]). Однако единого подхода к проектированию цифровых релейных систем управления не существует.

В статье рассматриваются релейные системы управления, работающие в дискретном времени. Они используются в системах управления летательными аппаратами, в управлении электрическими и гидравлическими приводами. В данной работе будем рассматривать РСУ с линейным объектом. Структурная схема замкнутой цифровой РСУ приведена на рис. 1.

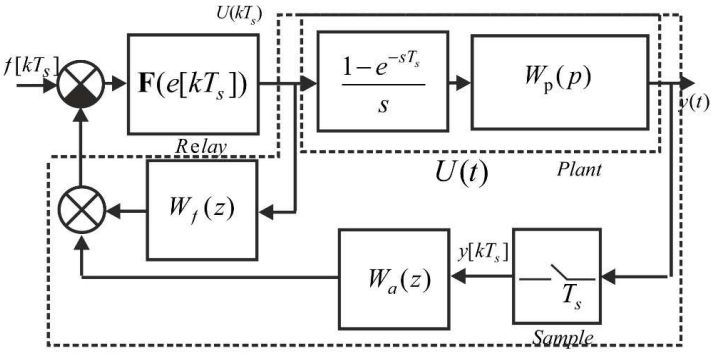


Рис. 1. РСУ с цифровым управлением

На рис. 1 $F(e[kT_S])$ определяет статическую характеристику двухпозиционного релейного элемента. На вход этого элемента подается последовательность $f(kT_S)$ - дискретный входной сигнал; $y(kT_S)$ - сигнал обратной связи, полученный из непрерывного сигнала посредством дискретизации с регулярным периодом T_S, $k = 0,1,2,...$Дискретная передаточная функция $W_f(z)$ должна обеспечивать желаемую частоту автоколебаний в системе. Структура и параметры этой передаточной функции будут определяться в системе без входного сигнала. Дискретная передаточная функция $W_a(z)$ обеспечит желаемые динамические показатели качества системы управления с обратной связью. Требование к разработанной автоколебательной системе управления состоит в том, чтобы минимизировать фазовую задержку в частотном диапазоне входного сигнала, т.е. $\min\limits_{\omega_0 \le \omega \le \omega_l} |\Phi(\omega)|$ где $\Phi(\omega)$ - фазовая частотная характеристика. Причем амплитудно-частотная характеристика $A(\omega)$ не должна отличаться от единицы.

Математическая модель замкнутой системы в пространстве состояний выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \mathbf{x}[(k+1)T_S] = \mathbf{\Phi}\mathbf{x}[kT_S] + \mathbf{\Psi}U[kT_S], \\ y[kT_S] = \mathbf{C}^T\mathbf{x}[kT_S], \\ U[kT_S] = A, если\ \mathbf{C}^T\mathbf{x}[kT_S] \ge -b, и\ \mathbf{x}[(k+1)T_S] < -b, \\ U[kT_S] = -A, если\ \mathbf{C}^T\mathbf{x}[kT_S] \le -b, и\ \mathbf{x}[(k+1)T_S] > -b, \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{1\times n}$ - фазовый вектор расширенной системы, $y[kT_S]$ - входной сигнал. Матрицы системы определяются с помощью хорошо известных зависимостей:

$$\mathbf{\Phi} = e^{\mathbf{A}T_S}, \mathbf{\Psi} = \int_0^{T_S} e^{\mathbf{A}t}dt\mathbf{B}, \quad (2)$$

где $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n\times n}, \mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n\times 1}$ - матрицы континуального объекта соответствующего размера.

При замыкании обратной связи без внешнего входного сигнала в рассматриваемых системах обычно возникают периодические колебания. Более того, как показано в работе [13], диапазон возможных частот колебаний значительно расширяется с учетом временной дискретизации и зависит от тактовой частоты квантования. При наличии входного сигнала $y(kT_s)$ устойчивая замкнутая система может работать в автоколебательном режиме слежения. Задача структурного синтеза – найти такую структуру регулятора, обеспечивающую выбранный режим работы и заданную частоту периодических колебаний. Соответственно, задача параметрической оптимизации - определить оптимальные параметры регулятора по заданному критерию.

Структурная коррекция должна учитывать следующие ограничения. Во-первых, регулятор должен быть физически реализуемым. Во-вторых, система управления должна быть реализована в цифровом виде. Далее рассмотрим параметрическую оптимизацию на примере синтеза системы с релейным элементом, как наиболее распространенную в классе разрывного управления. Для решения этой проблемы предлагается использовать метод дискретного фазового годографа [10].

Структура алгоритма синтеза автоколебательных РСУ может быть представлена следующей последовательностью:

1. Анализ динамических характеристик системы. Выбор желаемой частоты автоколебаний f_a и частоты дискретизации f_s.

2. Поиск структуры коррекции $W_f(z) = \dfrac{a_1 z^n + a_2 z^{n-1} + \ldots}{b_1 z^n + a_2 z^{n-1} + \ldots}$ и $W_a(z) = \dfrac{n_1 z^n + n_2 z^{n-1} + \ldots}{k_1 z^n + k_2 z^{n-1} + \ldots}$. Далее формулируется критерий качества для следящих систем. В данной статье требования к системе сформулированы в частотной области. Критерий должен быть представлен как:

$$Q(a_1, a_2, ..., b_1, b_2, .., n_1, n_2, ..., k_1, k_2 ..) = \min \max_{0 \le \omega \le \omega_{\max}} \left\| \Phi(\omega) \right\|. \quad (3)$$

Причем должно выполняться условие:

$$A_{\min} \le A(\omega, a, b, n, k) \le A_{\max}, 0 < \omega \le \omega_{\max}, \quad (4)$$

где $\omega_{\max}$ - максимальная частота гармонического входного сигнала $f(kT_s)$.

3. Неизвестные параметры передаточных функций $W_f(z)$ и $W_a(z)$, $a_1, a_2, ..., b_1, b_2, .., n_1, n_2, ..., k_1, k_2 ..$ определяются в результате конечномерной оптимизации. В работе предлагается алгоритм параллельной оптимизации с ограничениями. Алгоритм основан на методе оптимизации роя частиц (PSO) с учетом ограничений в виде функции штрафа.

4. При проектировании автоколебательной системы управления важно обеспечить желаемую частоту автоколебаний и ее стабильность.

Рассмотрим подробнее каждый этап синтеза цифрой РСУ.

Дискретный фазовый годограф. Одна из основных задач при проектировании RCS - определение возможных периодических движений в замкнутой системе.

Если матрица А непрерывной системы является устойчивой матрицей Гурвица, то в дискретной системе (1) может существовать семейство предельных циклов. Все симметричные периодические движения в цифровых РСУ могут быть определены методом дискретного фазового годографа [3].

Все симметричные периодические движения определяются из условия:

$$\begin{cases} \mathbf{C}\mathbf{x}^*(M) \ge -b, \\ \mathbf{C}\mathbf{x}^*(M-1) \ge -b, \end{cases} \quad (5)$$

где

$$\mathbf{x}^*(M) = (\mathbf{\Phi}^M + \mathbf{I})^{-1}(\mathbf{\Phi}^M + \mathbf{I})\mathbf{\Psi}A, \tag{6}$$

$$\mathbf{x}^*(M-1, T_S) = \mathbf{\Phi}^M \mathbf{x}[k] - (\mathbf{\Phi} - \mathbf{I})^{-1}(\mathbf{\Phi}^M - \mathbf{I})\mathbf{\Psi}A, \tag{7}$$

$\mathbf{I} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ – единичная матрица; $M = 2k, k = 1,2,3,...$ – количество тактов квантования на период повторения симметричных периодических движений.

Все значения M, при которых выполняются условия (5), являются возможными значениями периода автоколебаний в автономной РСУ. В случае линейного объекта управления фазовый годограф можно представить в виде:

$$y^*[M, \tau] = \frac{-1}{M} \sum_{n=1}^{M} \frac{(-1)^n}{\sin(\pi n / 2M)} \mathrm{Im}(W(e^{jn\omega_0})e^{jn\omega_0 \tau} e^{-j\pi n(M-0.5)M}), \tag{8}$$

где ω_0 - частота автоколебаний в непрерывной системе.

Периодические движения в цифровой РСУ могут быть определены с использованием непрерывной модели и введением эквивалентной задержки τ.

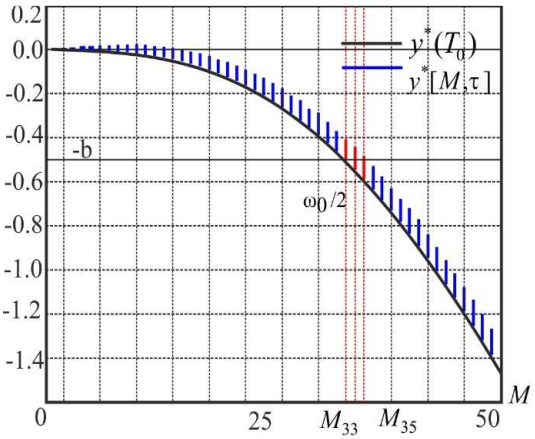


Рис. 2. Определение периодических движений в непрерывных и цифровых РСУ

На рис. 2 показано определение симметричных периодических движений в РСУ с использованием фазового годографа для непрерывного и дискретного времени. Как видно из рис. 2, дискретизация в РСУ приводит к появлению множества возможных периодических движений.

Метод фазового годографа позволяет определить наличие возможных периодических движений в РСУ. Однако это не означает, что в системе будет наблюдаться периодическое движение с этим периодом повторения. Необходимо, чтобы обнаруженные периодические движение в РСУ были устойчивыми.

Устойчивость периодических движений. Как было показано, в цифровой РСУ возможно существование нескольких различных периодических движений. Полупериод каждого предельного цикла отличается от соседнего цикла на такт квантования. Максимальное количество предельных циклов в дискретной системе - l. Дискретность по времени приводит к тому, что в фазовом пространстве релейной системы около поверхности переключения релейного элемента имеется некоторый пограничный слой, внутри которого происходит переключение реле:

$$\Delta S^+ = \{\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n : \mathbf{C}\mathbf{x} = b + \xi_k = \Delta S\}, k = 1,2,...,l, \tag{9}$$

$$\Delta S^- = \{\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n : \mathbf{C}\mathbf{x} = -b - \xi_k = -\Delta S\}, k = 1,2,...,l. \tag{10}$$

Параметр ξ_k соответствует каждому предельному циклу. На поверхности переключения имеется множество подходящих моментов переключения релейного элемента:

$$S_0 = \{\mathbf{x} \in S_l^+ : \mathbf{C\Phi x} + \mathbf{C\Psi} \geq 0\}, \tag{11}$$

$$S_1 = \{\mathbf{x} \in S_l^- : \mathbf{C\Phi x} - \mathbf{C\Psi} \geq 0\}. \tag{12}$$

Для определения устойчивости набора периодических движений в цифровой РСУ предлагается использовать $R\varepsilon$ критерий устойчивости. Цифровая РСУ является асимптотически устойчивой, если есть некоторое заданное $\varepsilon > 0$, такое что $R > \varepsilon > 0$, и решение системы $\mathbf{x}[k]$ с начальными условиями, принадлежащими сфере $B(0, \mathrm{R})$ с течением времени будет сходиться в область $B(0, \varepsilon)$, то есть $\mathbf{x}[k] \to B(0, \varepsilon), k \to \infty$.

Исходя из симметрии периодического движения, существует дискетное отображение:

$$\Delta_1 = T[k]\Delta, \tag{13}$$

$$T[k] = \left(\frac{Q[k]\mathbf{C}}{\mathbf{C}Q[k]} - \mathbf{I} \right) \mathbf{\Phi}^k, T[k] \to B(0, M), k \to \infty, \tag{14}$$

где $\mathbf{Q}[k] = \mathbf{\Phi}^k x^* - \mathbf{\Phi}^{M_{\max}} \mathbf{x}^* - (\mathbf{\Phi} - \mathbf{I})^{-1} \mathbf{\Psi} A + (\mathbf{\Phi}^{M_{\max}} - \mathbf{I}) \mathbf{\Psi} A.$

Нелинейное отображение сжимается, если в каждой точке *k* существует положительно определенная матрица Ляпунова и выполняется условие:

$$P - \mathbf{T}[k]^T \mathbf{P} \mathbf{T}[k] > 0. \tag{15}$$

В случае неустойчивой разомкнутой системы можно задать некоторое конечное значение и проверить выполнение условия (12), что обеспечит локальную практическую устойчивость в смысле определения устойчивости $R\varepsilon$.

Структурная коррекция. Под структурной коррекцией понимается выбор структуры передаточных функций $W_f(z)$ и $W_a(z)$. Передаточная функция $W_a(z)$ должна обеспечивать простую коррекцию частотной характеристики RCS. Самый простой вариант - использовать фильтр первого порядка:

$$W_a(z) = \bar{Z} \left\{ K_1 \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1} \right\}_{z = e^{T_s p}}.$$

Параметры K_1, T_1, T_2 настраиваются в ходе конечномерной оптимизации. Одна из конструктивных особенностей РСУ состоит в обеспечении необходимой частоты автоколебаний. Для этих целей в обратной связи релейного элемента используется передаточная функция $W_f(z)$. Для обеспечения нужной частоты удобно использовать фазовый годограф. Как видно из рис. 1, выходная составляющая (*R*-характеристика) фазового годографа передаточной функции добавляется к *R*-характеристике объекта. Главное требование к передаточной функции - простота реализации. *R*-характеристика такого звена должна иметь одно пересечение с горизонтальной линией, определяющей гистерезис реле. Передаточное число прямой цепи должно быть максимальным. Рассмотрим *R*-характеристики колебательного и апериодического типовых звеньев:

$$W_f(p) = \frac{K}{Tp + 1}, \tag{16}$$

$$W_f(p) = \frac{K}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}. \tag{17}$$

R-характеристика передаточной функции (16) имеет простую форму, но не обладает достаточной гибкостью для использования в качестве корректирующего устройства (рис. 3). Предпочтительно использование передаточной функции (17), у которой наблюдается резкий спад на высоких частотах автоколебаний. Частоту автоколебаний можно регулировать, изменяя коэффициент усиления *K*. Однако, при

использовании (17) возможно возникновение нескольких периодических движений. Лучшее решение для задания частоты автоколебаний это использование передаточной функции вида:

$$W_f(z) = \overline{Z}\left\{K_2\left(\frac{K_1}{T_1 p+1} - \frac{1}{T_2 p+1}\right)\right\}_{z=e^{T_s p}}. \qquad (18)$$

В выражении (18) значения K_1, T_1, T_2 постоянны и определяются на первых этапах синтеза РСУ, исходя из устойчивости автоколебаний.

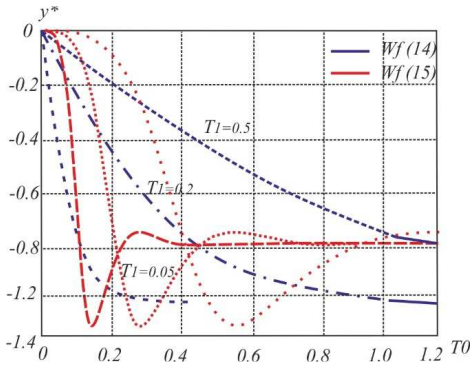


Рис. 3. R-характеристики передаточной функции $W_f(z)$

Параметрическая оптимизация РСУ. Алгоритм синтеза РСУ с цифровым управлением, разработанный в данной работе, состоит из нескольких основных этапов. Сначала задаются параметры цифрового контроллера, частота дискретизации, разрядность. На следующем этапе на основе анализа дискретного ФГ выбирается структура корректирующих устройств. Основным показателем качества слежения РСУ за входным сигналом, как правило, является фазовая задержка; поэтому принят критерий оптимизации, который быстро вычисляется на основе известных методов линеаризации [1] с учетом дискретизации. Параметрический синтез выполняется с использованием конечномерной оптимизации. Устойчивость периодических движений в цифровой RCS и физическая реализуемость фильтра выступают как ограничения на параметры корректирующих устройств. Метод роя частиц (PSO) реализован в виде алгоритма оптимизации [9]. Этот метод позволяет использовать параллельные вычисления, что значительно ускоряет процедуру синтеза. На последнем этапе проводится численное моделирование синтезированной системы управления, оценивается влияние дискретизации по уровню на качество процессов управления.

При реализации метода PSO в n-мерном пространстве оптимизации случайным образом создается набор точек, называемый роем частиц, в каждой из которых вычисляется значение целевой функции. Идея метода заключается в том, что каждая частица меняет свое положение в пространстве оптимизации на основе своего лучшего значения и глобального лучшего значения среди всех частиц. Скорость, с которой частицы движутся в пространстве, определяется выражением:

$$V_i[k+1] = \omega V_i[k] + C_1 r_1\left(p_i[k] - S_i[k]\right) + C_1 r_1\left(g[k] - S_i[k]\right). \qquad (19)$$

Новое положение частицы в пространстве поиска задается следующим выражением:

$$S_i[k+1] = S_i[k] + V_i[k+1], i = 1,2,...n., \qquad (20)$$

где $S[k]$ - текущая точка поиска; $S[k+1]$ - измененная точка поиска; $V[k+1]$ - измененная скорость для *i-й* точки; n - количество частиц; p_i - текущее значение *i-й* частицы; g_i - лучшее значение среди всех *i*-хчастиц; ω - весовой коэффициент для *i*-й точки (случайное число от 0 до 1); C_i - коэффициент инерции *i*-й частицы, который можно вычислить, используя выражение

$$C_i = \omega_{\max} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})k}{k_{\max}}, \tag{21}$$

$\omega_{\max}$ и $\omega_{\min}$ максимальный и минимальный весовые коэффициенты, k и $k_{\max}$ некоторые коэффициенты из диапазона $[0,1]$. В качестве критерия останова используется значение дисперсии ошибки роя частиц.

$$\sum_{k=1}^{n} \mathrm{var}(p_k) \le \varepsilon. \tag{22}$$

Ограничения, накладываемые на оптимизируемые параметры, учитываются в алгоритме путем введения специальных штрафных функций. Принцип их работы можно представить в следующем виде. Как только вектор оптимизируемых параметров какой-либо частицы из «роя» становится неприемлемым, то есть не удовлетворяющим требованию разброса параметров дифференцирующего фильтра, или периодический процесс в системе становится неустойчивым, то значению целевой функции присваивается некоторое большое значение, выполняющее функцию штрафа. В этом случае исходная задача минимизации функции *f* заменяется [8]:

$$f_{new}(x) = \begin{cases} f(x), if \ \ x \in \aleph, \\ +\infty. \end{cases} \tag{23}$$

где **N** - множество допустимых значений.

Основная проблема параметрической оптимизации - это многочисленные вычисления целевой функции:

$$Q(\mathbf{x}) = \min \max_{0 \le \omega \le \omega_{\max}} \left\| \Phi(\omega) \right\|, \tag{24}$$

$$A_{\min} \le A(\omega, \mathbf{x}) \le A_{\max}, 0 < \omega \le \omega_{\max}. \tag{25}$$

Эти вычисления можно проводить с помощью численного моделирования на основе линеаризации РЭ. Для дискретной РСУ каждому значению полупериода автоколебаний будет соответствовать определенный коэффициент передачи РЭ. Коэффициент передачи дискретной РСУ будет зависеть от эквивалентной задержки [10]:

$$K_{RE} = 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \, \mathrm{Re}(W_p(\frac{j\pi}{MT_s} k, \tau)). \tag{26}$$

Амплитудно-фазовые частотные характеристики замкнутой РСУ с линейным объектом, определенные по линейной модели, имеют вид:

$$\Phi(\mathbf{x}, \omega, \tau) = \arg\left[\frac{K_{RE}(\tau) W_p(\mathbf{x}, p)}{1 + K_{RE}(\tau) W_p(\mathbf{x}, p)} \right], \tag{27}$$

$$A(\mathbf{x}, \omega, \tau) = \left| \frac{K_{RE}(\tau) W_p(\mathbf{x}, p)}{1 + K_{RE}(\tau) W_p(\mathbf{x}, p)} \right|. \tag{28}$$

Используя выражения (27) и (28), можно быстро вычислить значение целевой функции параметрической оптимизации. Что значительно ускоряет процедуру синтеза РСУ.

Пример. В качестве примера рассмотрим синтез дискретной РСУ, блок-схема которой приведена на рис. 1, где

$$W_p(p) = \frac{K_1}{(T_1{}^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \tag{23}$$

$$W_a(p) = \frac{T_{a1} p + 1}{T_{a2} p + 1}, \tag{24}$$

$$W_f(p) = \frac{K_{f1}}{T_{f1}^2 p^2 + 2\xi_1 T_{f1} + 1}. \quad (25)$$

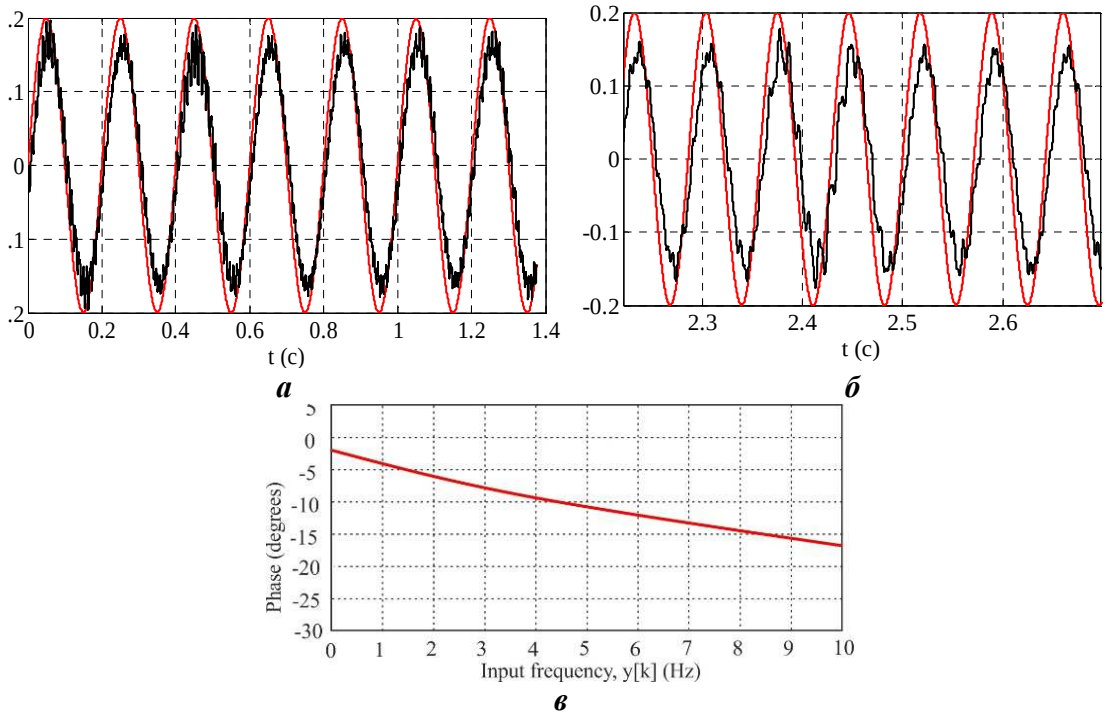
Параметры РСУ имеют следующие значения: $K_1 = 10$, $T_1 = 0.01$, $\xi = 0.3$, $T_2 = 0.03$, период дискретизации $T_s = 0.001(c)$. Параметры фильтра: $T_{f1} = 0.005$, $\xi_1 = 0.5$. T_{a1}, T_{a2}, K_{f1} - оптимизируемые параметры. Желаемая частота автоколебаний $f_a = 130$ (Гц). В системе без коррекции частота автоколебаний составляет30 (Гц).

Используя разработанный в данной работе алгоритм синтеза, были получены следующие значения:

$$W_a(z) = \frac{10.153z - 10.153}{z - 0.9996}, \quad (26)$$

$$W_f(z) = \frac{22.38z - 22.3371}{z^2 - 0.9996}. \quad (27)$$

Передаточные функции представлены в дискретной форме, где $z = e^{pT_s}$



а ***б*** ***в***

Рис. 4. Режим слежения за гармоническим входом и фазовая характеристика дискретной РСУ: а – слежение за входным сигналом частотой 5 Гц; б – слежение за входным сигналом частотой 15 Гц; в – фазовая частотная характеристика РСУ

На рис. 4 показан режим слежения за гармоническим входом и фазовая характеристика дискретной РСУ в диапазоне частот входного сигнала. Видно, что отставание по фазе не превышает -20 градусов, что является неплохим результатом.

В статье предлагается алгоритм синтеза автоколебательных релейных систем управления. Алгоритм синтеза RCS состоит из нескольких основных этапов. На первом этапе определяются параметры цифрового контроллера, частота дискретизации и разрядность в битах. На следующем этапе на основе анализа дискретного фазового годографа выбирается структура корректирующих устройств. Такие устройства задаются в виде линейных передаточных функций. Основной показатель качества для следящих RCS это фазовая задержка; поэтому принят критерий оптимизации, который быстро

вычисляется на основе известных методов линеаризации. Параметрический синтез выполняется с использованием конечномерной оптимизации. Устойчивость периодических движений в цифровой РСУ и физическая реализуемость фильтра задают ограничения на параметры корректирующих устройств. В качестве алгоритма оптимизации используется метод роя частиц (PSO). Этот метод позволяет реализовывать параллельные вычисления, что значительно ускоряет процедуру синтеза. На последнем этапе проводится численное моделирование синтезированной системы управления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-08-01141).

Список литературы

1. Фалдин Н.В., Феофилов С.В. Исследования периодических движений в релейных системах, содержащих звенья с ограничителями // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2007. №3. С.15-27.

2. Феофилов С.В. Периодические движения в релейных системах с цифровым управлением // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. №5. С. 11-17.

3. Feofilov S.V., Kozyr A.V. Analysis of Periodic Motions in Digital Self-Oscillating Control Systems, Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2018. Vol. 19. No. 8. P. 587—594. DOI: 10.17587/mau.19.587-594.

4. Johansson K.H. Limit cycles with chattering in relay feedback systems // IEEE Trans. Automatic control., 2002. P. 169-178.

5. Jorge M.G., Global stability of relay feedback systems // IEEE Trans. Automatic-control, 2001. Vol. 46. P. 550-562.

6. Моржов А.В., Моржова С.В. Синтез релейного автоколебательного объемного силового гидропривода при задании ограничений на чувствительность // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. №6. С. 39-44.

7. Garulli A., Giannitrapani A., Leomanni M. Minimum switching limit cycle oscillations for systems of coupled double integrators. In Decision and Control (CDC), 2014. IEEE 53rd Annual Conference on, 2014. P. 4655–4660.

8. Galias Z., Yu X. Euler's discretization of single input sliding-mode control systems, IEEE Transactions on Automatic Control, Sept. 2007. Vol. 52. No. 9. P. 1726—1730.

9. James Kennedy and Russell Eberhart. Particle swarm optimization. In Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway, NJ, 1995. IEEEPress, 1995. Vol. IV. P. 1942–1948.

Феофилов Сергей Владимирович, д-р техн. наук, профессор, Kozyr_A_V@mai.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Козырь Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, Kozyr_A_V@mai.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

STRUCTURAL AND PARAMETRIC SYNTHESIS OF DIGITAL AUTO-OSCILLATING CONTROL SYSTEMS

S.V. Feofilov, A.V. Kozyr

The paper deals with the problem of searching for the structure and optimization of parameters of digital self-oscillating control systems with discontinuous control. Discretization of signals in such systems leads to significant differences from the analog case, which does not allow using the well-known classical theory of relay control systems. A technique for the synthesis of a digital control system is proposed, which takes into account the discrete

implementation already at the stage of optimization of the controller parameters. An example of the synthesis of a specific digital control system for a technical object is given, demonstrating the advantages of the approach used in comparison with existing methods.

Key words: digital self-oscillating control system, relay, synthesis, phase hodograph of the relay system.

Feofilov Sergey Vladimirovich, doctor of technical science, professor, Kozyr_A_V@mai.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kozyr Andrey Vladimirovich, candidate of technical science, docent, Kozyr_A_V@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 629.052.6

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ДОСТИЖЕНИЯ ЗАДАННОЙ ОБЛАСТИ ПОИСКА ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

С.В. Феофилов, Д.С. Феофилов

Предлагается алгоритм, позволяющий выбирать кратчайшую траекторию полета БПЛА до заданной области ответственности. Решение ищется с помощью методов конечномерной оптимизации на основе теоремы Куна-Таккера. Разработанный алгоритм может быть использован в бортовом программном обеспечении. Рассмотрен поиск оптимальной траектории на конкретном примере произвольно заданных начальных координат и области, определяемой выражениями в виде неравенств.

Ключевые слова: БПЛА, траектория полета, теорема Куна-Таккера, метод неопределенных множителей Лагранжа.

В современном мире беспилотные летательные аппараты (БПЛА) выполняют множество задач во всех сферах деятельности человека: от видеосъемки, до поиска людей на местности. Достоинства беспилотных комплексов очевидны [1, 2]. В первую очередь это отсутствие человека на борту, что позволяет разработчикам не задумываться над системами жизнеобеспечения, а, значит, появляется возможность существенно снизить массу и габариты аппарата. Этому также способствуют достижения современной электроники, позволяющие выполнить бортовые системы, в том числе и навигационную с минимальными массогабаритными показателями. Стремительному распространению дистанционно-пилотируемых аппаратов во всех сферах деятельности способствует также относительная дешевизна производства и обслуживания, возможность работы в недоступных другой технике условиях. Однако отсутствие человека на борту имеет и недостатки. Это приводит к тому, что система управления летательного аппарата должна стать более интеллектуальной и брать на себя многие традиционные функции пилота. В этой связи огромную роль играют те алгоритмы, которые закладываются в бортовое программное обеспечение. Один из них рассматривается в настоящей работе.

Постановка задачи. Одной из важнейших задач при выполнении поисковых, гражданских или учебных операций является разведка местности или поиск объекта на ней [3, 4]. Большинство гражданских специальных служб уже имеют в своем составе беспилотные комплексы, которые используются для поиска различных объектов. Это существенно повышает эффективность ведения наблюдательных и поисковых операций, которые могут проводиться с непрерывной передачей информации на пункт управления.

Наиболее распространенной в указанных операциях является задача оперативного обследования заданной области поиска. При этом результат во многом зависит от времени реагирования и оперативности доставки БПЛА в указанную зону, которая может иметь произвольную геометрическую форму, определяемую ландшафтом местности или другими априори заданными ограничениями. Современные технологии позволяют БПЛА иметь отличные характеристики, а системы GPS и ГЛОНАСС обеспечивают определение точного местонахождения объекта. Необходимо разработать алгоритм, вычисляющий кратчайшее расстояние от БПЛА до заданной области и прокладывающий маршрут по ортодромии. Таким образом, первой задачей, которую должно решать бортовое программное обеспечение является расчет оптимальной по времени траектории полета из текущего местоположения БПЛА до заданной области поиска. На первый взгляд решение этой проблемы кажется тривиальным. Однако, при отсутствии человека на борту и произвольной геометрии зоны ответственности, а также необходимости получения универсального алгоритма решение оказывается затруднительным.

Рассмотрим математическую постановку задачи. Зона поиска на земной поверхности без учета ее кривизны задается ограничениями типа неравенств вида:

$$h_j(x, y) \geq 0\,, \tag{1}$$

где x, y - декартовы координаты. Необходимо найти кратчайшую траекторию полета от начальных координат БПЛА (x_0, y_0) до границы области ответственности (1). Длина этой траектории будет определяться модулем вектора с координатами $(X - x_0, Y - y_0)$, где (X, Y) искомые координаты ближайшей точки, лежащей на границе заданной зоны (1). Таким образом, функция, подлежащая минимизации, имеет вид:

$$f(X, Y) = \sqrt{(X - x_0)^2 + (Y - y_0)^2}\,. \tag{2}$$

Оптимизация траектории. Для создания алгоритма поиска оптимальной траектории, который может быть использован в бортовом вычислителе, предлагается решать поставленную выше задачу методами конечномерной оптимизации. Для поиска неизвестных координат (X, Y) можно воспользоваться известной теоремой Куна – Таккера [5]. Сформулируем ее применительно к данной задаче.

Пусть имеется некоторая функция:

$$Q(x_1, x_2, \ldots, x_n) = 0\,, \tag{3}$$

переменных $x_1, x_2, \ldots, x_n$. На значения параметров $x_1, x_2, \ldots, x_n$ наложены ограничения

$$g_i(x_1, x_2, \ldots, x_n) = 0 \quad \left(i = \overline{1, k}, k < n\right); \tag{4}$$

$$h_j(x_1, x_2, \ldots, x_n) \geq 0 \quad \left(j = \overline{1, p},\right). \tag{5}$$

Требуется среди переменных $x_1, x_2, \ldots, x_n$, удовлетворяющих ограничениям (4), (5), найти такие, которые доставляют минимум функции (3).

Рассмотрим функцию:

$$\Phi = Q(x_1, \ldots, x_n) + \sum_{i=1}^{k} \lambda_i g_i(x_1, \ldots, x_n) + \sum_{j=1}^{\rho} \mu_j \left[h_j(x_1, x_2, \ldots, x_n) - v_j^2\right], \tag{6}$$

где λ_i, μ_j – неизвестные множители Лагранжа.

Пусть некоторая точка $\overrightarrow{x^0}$ является решением задачи оптимизации (3) – (5). Если точка $\overrightarrow{x^0}$ регулярна, то найдутся такие числа $\lambda_i \left(i = \overline{1, k}\right), \mu_j \left(j = \overline{1, \rho}\right)$, что имеют место соотношения:

$$\left.\begin{array}{l}
\dfrac{\partial Q\left(\overrightarrow{x^0}\right)}{\partial x_\nu}+\sum\limits_{i=1}^{k}\lambda_i\dfrac{\partial g_i\left(\overrightarrow{x^0}\right)}{\partial x_\nu}+\sum\limits_{j=1}^{\rho}\mu_j\dfrac{\partial h_j\left(\overrightarrow{x^0}\right)}{\partial x_\nu}=0\left(\nu=\overline{1,n}\right);\\
\mu_j h_j\left(\overrightarrow{x^0}\right)=0\left(j=\overline{1,\rho}\right);\\
g_i\left(\overrightarrow{x^0}\right)=0\left(i=\overline{1,k}\right),\ h_j\left(\overrightarrow{x^0}\right)\ge 0\left(j=\overline{1,\rho}\right);\\
\mu_j\le 0\left(j=\overline{1,\rho}\right).
\end{array}\right\} \qquad (7)$$

Как видно из формулировки, Теорема Куна – Таккера задает необходимые условия минимума. Однако, если задача оптимизации содержит только ограничения второго рода, то, положив в условиях (7)

$$\mu_j<0\left(j=\overline{1,\rho}\right),$$

имеем достаточные условия минимума. Именно этот случай актуален для решения сформулированной выше задачи поиска оптимальной траектории полета. При этом вместо функции $Q(x_1,\dots,x_n)$ следует использовать функцию двух переменных (2). Таким образом, решение системы (7) даст искомые координаты (X,Y) ближайшей точки на границе заданной области поиска и неизвестные множители μ_j. Коэффициенты h_j будут отсутствовать, так как в задаче нет ограничений первого рода.

Пример. Пусть область поиска для БПЛА ограничена следующими функциями. Она показана на рис.1.

$$y1(x)=2x^2+2,$$
$$y2(x)=4x+10,$$
$$y3(x)=-8x+20.$$

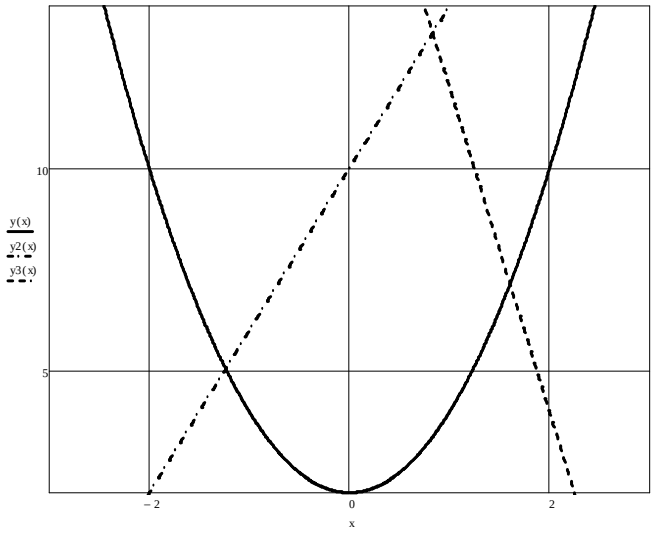


Рис. 1. Область ответственности БПЛА

Начальное положение летательного аппарата определяется точкой А(-3;10). Перепишем ограничения в виде неравенств:

$$\begin{array}{ll}
h1(X,Y)=-2X^2-2+Y, & \begin{cases} h1(X,Y)\ge 0,\\ h2(X,Y)\ge 0,\\ h3(X,Y)\ge 0. \end{cases}\\
h2(X,Y)=4X+10-Y, & \\
h3(X,Y)=-8X+20-Y; &
\end{array}$$

Минимизируется функция $f(X,Y)=\sqrt{(X+3)^2+(Y-10)^2)}$, тогда функция оптимизации Лагранжа будет выглядеть следующим образом:

$$\Phi(X,Y,\mu1,\mu2,\mu3)=f(X,Y)+\mu1\cdot h1(X,Y)+$$
$$+\mu2\cdot h2(X,Y)+\mu3\cdot h3(X,Y),$$

где μ1, μ2, μ3 – неопределенные множители Лагранжа, которые должны быть строго меньше нуля по условиям теоремы Куна – Таккера.

Составим систему:

$$\begin{cases}\dfrac{\partial}{\partial X}\Phi(X,Y,\mu1,\mu2,\mu3)=0,\\ \dfrac{\partial}{\partial Y}\Phi(X,Y,\mu1,\mu2,\mu3)=0,\\ h1(X,Y)\cdot\mu1=0,\\ h2(X,Y)\cdot\mu2=0,\\ h3(X,Y)\cdot\mu3=0.\end{cases}$$

При этом должны выполняться неравенства:

$$\begin{cases}h1(X,Y)\ge 0,\\ h2(X,Y)\ge 0,\\ h3(X,Y)\ge 0,\\ \mu_1<0,\\ \mu_2<0,\\ \mu_2<0.\end{cases}$$

Решение системы алгебраических уравнений не вызывает затруднений. Отбросив корни не удовлетворяющее неравенствам, получаем следующий вектор, определяющий искомую точку:

$$\begin{cases}X=-0{,}176,\\ Y=9{,}294,\\ \mu1=-5\cdot10^{-6},\\ \mu2=-0{,}243,\\ \mu3=-3\cdot10^{-5}.\end{cases}$$

На рис. 2 показана оптимальная траектория.

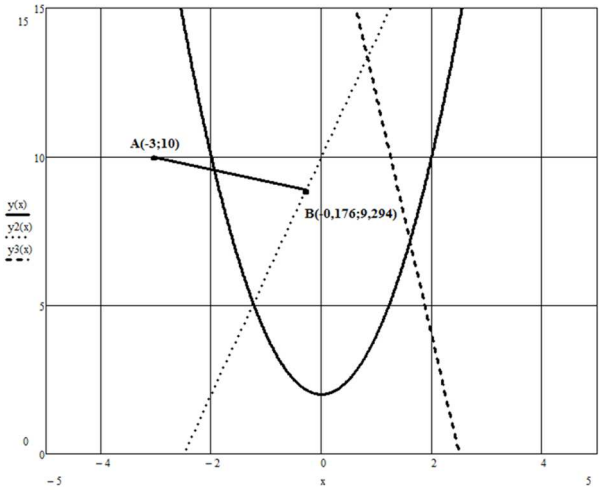


Рис. 2. Оптимальная траектория

В работе рассматривается проблема автономного построения кратчайшей траектории полета до произвольно заданной области ответственности беспилотного летательного аппарата. Поиск траектории сводится к решению задачи конечномерной оптимизации, которая может быть решена любым известным методом. Предлагается алгоритм, построенный на использовании теоремы Куна-Таккера. Рассмотренный числовой пример демонстрирует работоспособность и эффективность данного подхода.

Список литературы

1. Богословский С.В., Дорофеев А.Д. Динамика полёта летательных аппаратов: учебное пособие. СПбГУАП. СПб., 2002. 64 с.

2. Гущина Д.С. и др. Беспилотные авиационные комплексы ч.1 Структура и организация функционирования // Изв. вузов. Авиационная техника. 2006. №2. С. 3-6.

3. Красильщиков М.Н. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / под ред.: М.Н. Красильщиков, Г.Г. Себрякова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 280 с.

4. Бабичев В.И., Фимушкин В.С., Горячев О.В., Неклюдов А.И., Феофилов С.В. Методика проектирования аппаратуры наведения, целеуказания и стабилизации в составе беспилотного летательного аппарата // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2012. Вып. 11. Часть 1. С. 203-212.

5. Фалдин Н.В., Руднев С.А. Оптимизация в конечномерном пространстве. Тула: ТПИ, 1986. 72 с.

Феофилов Сергей Владимирович, д-р техн. наук, профессор, svfeofilov@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Феофилов Дмитрий Сергеевич, студент, fd19072002@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

OPTIMIZATION OF THE REACHING TRAJECTORY A GIVEN SEARCH AREA FOR AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

S.V. Feofilov, D.S. Feofilov

An algorithm is proposed that allows to choose the shortest UAV flight path to a given area of responsibility. The solution is sought using finite-dimensional optimization methods based on the Kuhn-Tucker theorem. The developed algorithm can be used in the onboard software. The search for the optimal trajectory is considered on a specific example of arbitrarily given initial coordinates and the area defined by expressions in the form of inequalities.

Key words: UAV, flight trajectory, Kuhn-Tucker theorem, method of indefinite Lagrange multipliers.

Feofilov Sergei Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, svfeofilov@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Feofilov Dmitriy Sergeevich, student, fd19072002@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.032.26

БАЗОВЫЙ СИНТЕЗ НЕЙРОСЕТЕВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

С.В. Феофилов, Д.Л. Хапкин

В работе рассматриваются некоторые подходы к обучению нейросетевых регуляторов. Затрагиваются вопросы истории их использования, классификации и актуальности применения в современной технике. На простых примерах иллюстрируются некоторые подходы к синтезу прямого и инверсного нейроэмуляторов.

Ключевые слова: системы управления, искусственные нейронные сети, нейроэмулятор, нейросетевые регуляторы.

Многие современные объекты управления являются настолько сложными, что использование классических методов для синтеза регуляторов невозможно. Кроме того, математические модели большинства объектов являются неточными, а их параметры могут изменяются в процессе эксплуатации. Все это приводит либо к применению слишком громоздких алгоритмов проектирования, либо к чрезмерному упрощению математических моделей. Это снижает эффективность проектирования и ведет к ухудшению качества управления. Одним из подходов к решению указанных проблем является использование нейросетевых регуляторов, которые позволяют придать системе свойства адаптивности и робастности. При этом для обучения используются данные с реального объекта управления, а не с модели.

Разработка искусственных нейронных сетей (ИНС) началась в конце 50-х годов, как математическая модель, идейно повторяющая биологические нейронные сети мозга [1]. Первые попытки использовать ИНС для управления объектами были предприняты в 70-х годах [2]. В настоящее время установлено, что существует большой потенциал использования ИНС в регуляторах для достижения качественной работы системы управления.

Основными архитектурами ИНС для применения в нейрорегуляторах считаются многослойные и рекуррентные нейронные сети. К настоящему времени разработаны типовые схемы САУ на основе нейрорегуляторов [3]. Эти схемы используют в себе только архитектуру многослойного перцептрона с временными задержками на входе [4, 5]. Каждая из типовых схем имеет свои недостатки и не является универсальной.

Работа посвящена использованию в системах управления прямого и инверсного нейроэмуляторов.

Прямой нейроэмулятор. Прямой нейроэмулятор обучается повторять динамику объекта управления (рис. 1).

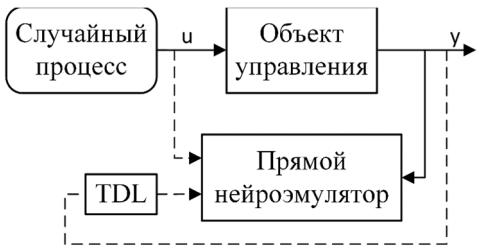


Рис. 1. Схема обучения прямого нейроэмулятора

На рис. 1 на вход нейронной сети (прямой нейроэмулятор) как для обучения, так и для дальнейшего использования подается вектор, состоящий из текущего входного воздействия и реакции объекта на прошлые воздействия $y(n-1), y(n-2),...$ Для получения текущей ошибки, необходимой для обучения выход нейронной сети сравнивается

с выходом объекта. Обучение производится в режиме оффлайн методом «обратного распространения ошибки». После обучения нейронная сеть повторяет прямую динамику объекта.

Прямой нейроэмулятор полезен, когда имеется объект, математическая модель которого неизвестна или является неточной, но при этом имеется возможность экспериментального изучения его реакции на тестовые сигналы. Такой нейроэмулятор повторяет динамику объекта управления. Он используется в таких нейросетевых методах управления как: метод обратного пропуска ошибки через прямой нейроэмулятор, прогнозирующее модельное нейроуправление.

Рассмотрим пример выбора структуры прямого нейроэмулятора.

Так как для обучения и использования нейронной сети требуются данные с задержкой, а также искусственные нейронные сети обычно реализуются на цифровых устройствах, то представим объект управления в дискретном виде:

$$W(z) = \frac{b_0 z^m + b_1 z^{m-1} + \cdots + b_m}{z^n + a_1 z^{n-1} + \cdots + a_n}.$$

Разностное уравнение объекта будет иметь вид:

$$y(n) + a_1 y(n-1) + \ldots + a_N y(n-N) = b_0 u(n) + b_1 u(n-1) + \ldots + b_M u(n-M).$$

Из разностного уравнения видно, что структура нейронной сети, например, может соответствовать следующему уравнению (1):

$$y(n) = b_0 u(n) + b_1 u(n-1) + \ldots + b_M u(n-M) - a_1 y(n-1) - \ldots - a_N y(n-N). \qquad (1)$$

Таким образом, для линейных объектов достаточно нейронной сети с одним нейроном. Структура представлена на рис. 2.

Первый столбец нейронов называется входной слой. Нейроны во входном слое обычно не изменяют данные. Нейрон на выходе системы, это нейрон выходного слоя. В данной системе отсутствуют скрытые слои, так как структура сети выбрана согласно уравнению. Как видно из рис. 2. нейроны не имеют функций активации. Они не требуются для линейной системы. В результате обучения веса W должны стать равными весам разностного уравнения (1).

Нейронная сеть со скрытым слоем представлена на рис. 3.

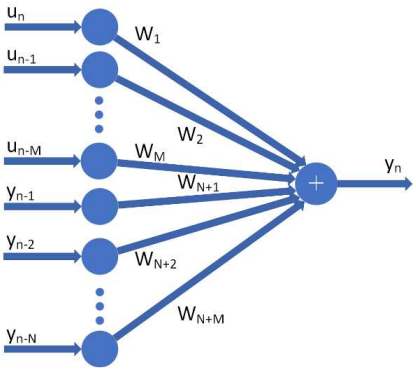


Рис. 2. Структура нейронной сети для использования в качестве прямого нейроэмулятора

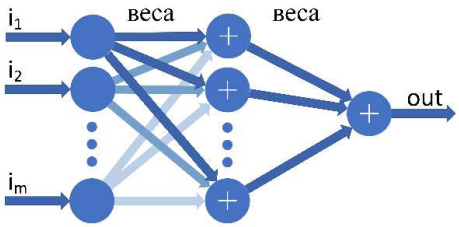


Рис. 3. Структура ИНС с одним скрытым слоем

Данная структура ИНС будет применяться в некоторых экспериментах, чтобы отобразить ее влияние на качество работы.

Пример с прямым нейроэмулятором. Для простого примера рассмотрим колебательное звено в качестве объекта управления:

$$W(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2T\xi s + 1}.$$

Представим объект в виде дискретной передаточной функции:

$$W(z) = \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2}.$$

Таким образом, выход системы вычисляется в соответствии с разностным уравнением:

$$y(n) = b_0 x(n) + b_1 x(n-1) + b_2 x(n-2) - a_1 y(n-1) - a_2 y(n-2). \quad (2)$$

Из уравнения (2) можно увидеть, что для нейронной сети, состоящей только из входного слоя и одного выходного нейрона, требуется на вход подать текущее и два предыдущих значения выхода объекта, а также текущее и предыдущие управляющие значения.

В итоге, при такой структуре весовые коэффициенты обученной нейронной сети стремятся к ожидаемым, т.е. к значениям коэффициентов в уравнении (2). Выход обученной нейронной сети в сравнении с выходом объекта на этот же сигнал представлен на рис. 4.

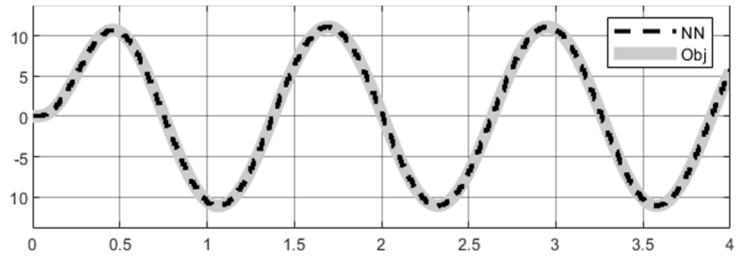


Рис. 4. Выход прямого нейроэмулятора и выход объекта управления

Также были проведены эксперименты с другими комбинациями входов и слоев. Например, в структуру ИНС добавлялся скрытый слой с 30 нейронами и функцией активации ReLU, а на вход подавалось 4 предыдущих состояния объекта, текущее и 3 предыдущих значения сигнала управления. Обучение при этом происходило гораздо дольше, но результат практически не изменился по сравнению со структурой ИНС, соответствующей уравнению (2), (рис. 5).

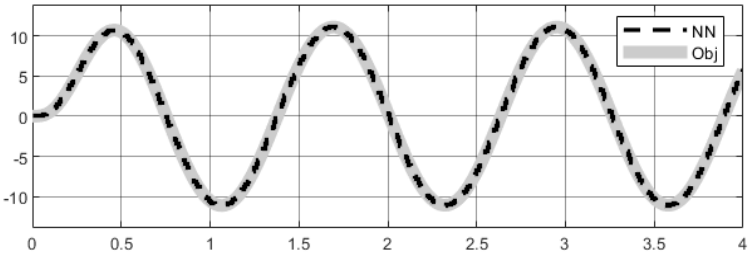


Рис. 5. Выход прямого нейроэмулятора (ИНС со скрытым слоем) и выход объекта, с которого снимались данные

Таким образом, видно, что нейронная сеть с достаточным количеством входной информации (для данного примера количество входов $2n+1$ может обучиться качественно повторять динамику объекта. Использование функции активации не влияет на качество работы прямого нейроэмулятора для линейного объекта.

Инверсный нейроэмулятор. Инверсный нейроэмулятор используется в методах «обобщенное инверсное нейроуправление» и «специализированное инверсное управление». В этих методах нейронная сеть обучается повторять инверсную динамику объекта управления и после обучения используется как регулятор (рис.6).

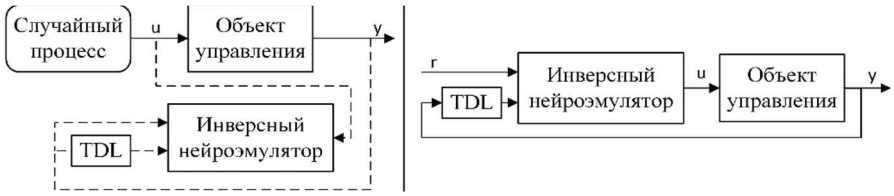


Рис. 6. Схема обучения (слева) и применения (справа) инверсного нейроэмулятора в методе «обобщенного инверсного нейроуправления»

Для обучения инверсного нейроэмулятора используется информация текущего и предыдущих выходов системы и, иногда, предыдущие управляющие значения в качестве входного вектора. На выходе инверсный нейроэмулятор должен выдавать управляющий сигнал, который приведет объект в требуемое состояние.

Недостатком метода обобщённого инверсного нейроуправления является трудность в составлении обучающей выборки, выраженная в подборе идентифицирующего процесса. Также трудности могут быть, если инверсия ОУ является неоднозначной функцией. Это может привести процесс обучения в тупик.

Получим требуемую функцию из разностного уравнения объекта:

$$u(n) = \frac{y(n) + a_1 y(n-1) + \ldots + a_N y(n-N) - b_1 u(n-1) - \ldots - b_M u(n-M)}{b_0}.$$

Проблемой становится коэффициент b_0. Если в математическом описании объекта управления не имеется прямых связей от входа к выходу, и объект физически реализуем, то этот коэффициент равен 0. Т.е. вычислить $u(n)$часто невозможно.

Однако, в данном методе, при подключении инверсного нейроэмулятора в качестве регулятора управляющее значение rподается вместо сигнала $y(n)$ на вход ИНС. Так как после обучения такой регулятор должен выдавать сигнал, который на следующий такт приведет систему в заданное значение, то $r(n) = y(n+1)$. Из этого следует, что требуемое значение $u(n)$можно найти следующим образом:

$$u(n) = \frac{y(n+1) + a_1 y(n) + \ldots + a_N y(n-N+1) - b_0 u(n+1) - \ldots - b_M u(n-M+1)}{b_1}. \quad (3)$$

Так как b_0 предполагается равным нулю, то уравнение (3) примет вид:

$$u(n) = \frac{y(n+1) + a_1 y(n) + \ldots + a_N y(n-N+1) - b_2 u(n-1) - \ldots - b_M u(n-M+1)}{b_1}. \quad (4)$$

В [3] предлагается брать только текущее и предыдущие выходы объекта. В таком подходе не ясно, сколько их требуется для получения качественного управления. Рассмотрим оба этих варианта.

Пример с инверсным нейроэмулятором. В качестве объекта возьмем, как и в пошлом примере, колебательно звено.

Согласно уравнению (4) для объекта управления получим:

$$u(n) = \frac{y(n+1) + a_1 y(n) + a_2 y(n-1) - b_2 u(n-1)}{b_1}. \quad (5)$$

Результат работы системы автоматического управления с обученным инверсным нейроэмулятором по методу «Обобщенного инверсного управления» представлен на рис. 7.

Качество полученного регулятора зависит от общего количества обучающих данных и их соотношения между выборками, построенными на основе разных входных сигналов. Для обучения всех нейронных сетей использовался сбор данных с объекта

(моделирование в Simulink) при типовых входных сигналах (гармоническом, ступенчатом и случайном). Экспериментально было замечено, что при маленьком количестве (или отсутствии) ступенчатых сигналов для обучения система будет иметь заметную статическую ошибку.

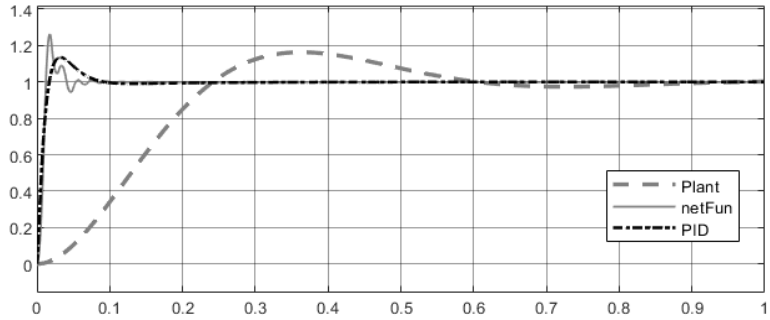


Рис. 7. Реакция на ступенчатый сигнал: объекта управления, системы с инверсным нейроэмулятором, обученным по уравнению (5), системы с ПИД регулятором

Для примера была рассмотрена нейронная сеть, которая учитывает только предыдущие значения выхода системы, как предлагается сделать в [3]. Была выбрана структура с 50 нейронами в скрытом слое и 11 нейронами во входном слое. Для обучения на вход поступала только информация с выхода объекта (1 текущий выход от объекта и 10 предыдущих значений). Результат работы приведен на рис. 8.

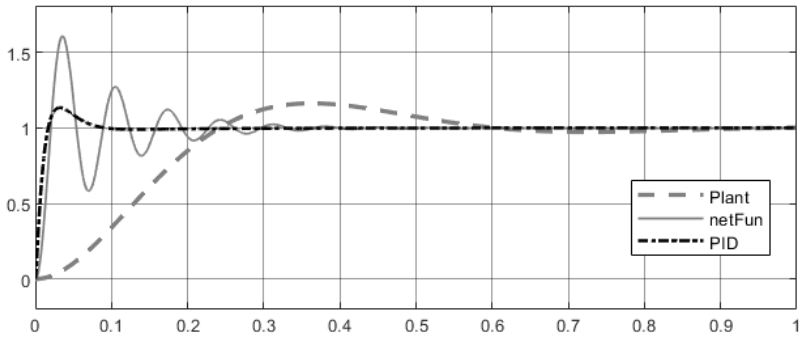


Рис. 8. Реакция на ступенчатый сигнал: объекта управления, системы с инверсным нейроэмулятором, обученным только по предыдущим состояниям системы, системы с ПИД регулятором

По приведенным результатам (рис. 7 и рис. 8) можно видеть, что инверсный нейроэмулятор при наличии обратных связей по управляющему сигналу работает лучше, чем без них. Это можно объяснить тем, что предыдущие значения выхода регулятора несут в себе более полную информацию об объекте.

Заключение. Были рассмотрены прямой и инверсный нейроэмуляторы. Нейронная сеть в прямом нейроэмуляторе обучается легко и качественно. Прямой нейроэмулятор используется как базовый элемент в некоторых схемах обучения. С помощью него возможно качественно воспроизводить динамику объекта управления.

Обучение инверсного нейроэмулятора связано с проблемой формирования обучающей выборки, а также с ограничением структуры перцептрона для данной задачи по сравнению, например, с рекуррентной нейронной сетью.

Поэтому дальнейшее направление исследований связано с рассмотрением рекуррентных нейронных сетей в качестве нейроэмулятора, а также улучшением качества инверсного нейроэмулятора методом обучения с подкреплением.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-38-90213).

Список литературы

1. Rosenblatt F. The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain // Cornell Aeronautical Laboratory / Psychological Review. 1958. Vol. 65, No. 6. P. 386–408.

2. Цыпкин Я.З. Обучающиеся автоматические системы // Журнал «Автоматика и телемеханика», 1970. № 4. С. 55 – 71.

3. Чернодуб А.Н., Дзюба Д.А. Обзор методов нейроуправления // Проблемы программирования. 2011. № 2. С. 79–94.

4. Lang K.J., Waibel A.H., Hinton G.E. A Time-Delay Neural Network Architecture for Isolated Word Recognition // Neural Networks, 1990. Vol. 3. No. 1. P. 23–43.

5. Phoneme Recognition Using Time-Delay Neural Networks / A. Waibel et al. // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1989. Vol. 37. No. 3. P. 328–339.

6. Werbos P. Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences. PhD thesis, Harward University, 1974.

7. Галушкин А. Синтез многослойных систем распознавания образов. М.: Энергия, 1974. 368 с.

Феофилов Сергей Владимирович, д-р техн. наук, доцент, svfeofilov@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Хапкин Дмитрий Леонидович, аспирант, dima-hapkin@ya.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

BASIC SYNTHESIS OF NEURAL NETWORK REGULATORS FOR FOLLOWING CONTROL SYSTEMS

S.V. Feofilov, D.L. Khapkin

The paper discusses some approaches to training neural network regulators. The questions of the history of their use, classification and relevance of their application in modern technology are touched upon. Some of the approaches to the synthesis of direct and inverse neuroemulators are illustrated with simple examples.

Key words: control systems, artificial neural networks, neuromotor, neural network controllers.

Feofilov Sergey Vladimirovich, doctor of technical sciences, docent, svfeofilov@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Khapkin Dmitry Leonidovich, postgraduate, dima-hapkin@ya.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 62-51

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЖИМА В СЛЕДЯЩЕМ ПРИВОДЕ

Н.Н. Макаров, С.А. Руднев, Е.В. Плыкина

Целью работы является формирование и сравнение разных вариантов реализации цифрового закона управления следящим приводом, сочетающих высокую точность слежения с низкой параметрической чувствительностью. Определяется особый режим движения – цифровой скользящий режим, обеспечивающий движение по поверхности переключений при дискретном времени.

Ключевые слова: следящая система, цифровой регулятор, оптимальное управление, скользящий режим.

1. Введение. Известно, что высокие результаты по точности показывает закон управления, оптимальный по быстродействию [1, 2]. При определённых условиях он обеспечивает идеальное слежение за сигналами из заданного класса. С другой стороны, оптимальный по быстродействию закон управления оказывается релейным, управляющий сигнал u, значения которого ограничены по модулю, $|u| \le A$, принимает только крайние значения $+A$ или $-A$ и конкретное его значение определяется положением изображающей точки по отношению к некоторой поверхности (гиперповерхности), называемой поверхностью переключений. Слежение в такой системе возможно только в скользящем режиме, когда изображающая точка движется по поверхности переключений.

2. Оптимальный по быстродействию следящий привод. Динамику автономного привода будем описывать упрощённой моделью второго порядка:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{T}\cdot(K\cdot u - x_2), \end{aligned} \tag{1}$$

где x_1 – выходная координата привода, u –управляющее воздействие, ограниченное про модулю: $|u| \le A$.

К системе (1) применима теорема о числе переключений [2], согласно которой оптимальное по времени управление, приводящее систему из произвольного начального состояния в положение равновесия $(x_1 = 0,\ x_2 = 0)$ задаётся равенством:

$$\begin{aligned} u(x_1, x_2) &= A\cdot sign(\sigma(x_1, x_2)), \\ \sigma(x_1, x_2) &= \phi(x_2) - x_1. \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь $x_1 = \phi(x_2)$ – уравнение линии переключений, которая является объединением траекторий, приходящих в положение равновесия с постоянным управлением, равным $+A$ и $-A$. Качественно фазовый портрет системы с таким управлением представлен на рис. 1. На этом рис. изображена линия переключений (жирная) и траектории, приходящие на эту линию с управлением $u = A$и достигающие положения равновесия с управлением $u = -A$. Симметричные траектории отсутствуют.

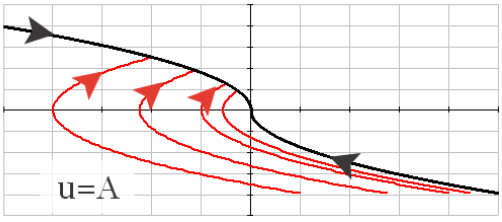


Рис. 1. Фазовый портрет оптимальной системы

На рис. 2 приведена структурная схема уже следящей системы, в которой управление формируется по формуле (2) с заменой фазовых координат на координаты в пространстве ошибок.

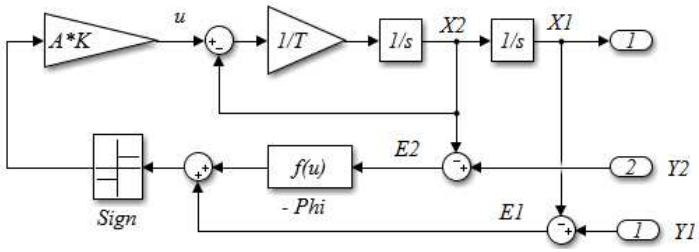


Рис. 2. Оптимальная по времени следящая система

На рис. 2 Y1 и Y2 – входной сигнал и его производная, E1 и E2 – ошибка слежения и её производная соответственно. В этой системе возможноидеальное слежение, при котором ошибка слежения тождественно равна нулю.Выпишемусловиясуществования такого режима, для чего перепишем (1) в ошибках:

$$\begin{aligned} e_1 &= y_1 - x_1, \\ e_2 &= y_2 - x_2, \\ \dot{e}_1 &= e_2, \\ \dot{e}_2 &= \dot{y}_2 - \dot{x}_2 = \dot{y}_2 - \frac{K}{T}\cdot u + \frac{1}{T}(y_2 - e_2)\cdot \end{aligned} \tag{3}$$

Пусть теперь имеет место идеальное слежение, то есть $e_1(t) \equiv 0$, а следовательно тождественно равны нулю и все производные ошибки. Тогда из (3) следует, что:

$$u(t) = \frac{T}{K}\left(\dot{y}_2 + \frac{1}{T}y_2\right), \tag{4}$$

если только правая часть (4) не превосходит по модулю A, $\left|\frac{T}{K}\left(\dot{y}_2 + \frac{1}{T}y_2\right)\right| \le A$, то есть в системе достаточно ресурсов управления, существует такое управление $u(t)$, при котором реализуется идеальное слежение. Покажем, что (2) как раз и является таким управлением.Подставим (2) в (4) и, учитывая условие $e_1(t) \equiv 0$, получим

$$\begin{aligned} u(e_1, e_2) &= -A \cdot sign(\sigma(e_1, e_2)), \\ \sigma(e_1, e_2) &= e_1 - \phi(e_2). \end{aligned} \tag{5}$$

При управлении (5) в системе возникает скользящий режим [3], если окажутся выполненными следующие условия:

$$\begin{aligned} &\sigma(e_1, e_2) = 0, \\ &\left.\frac{d\sigma(e_1(t), e_2(t))}{dt}\right|_{u=A} \ge 0, \\ &\left.\frac{d\sigma(e_1(t), e_2(t))}{dt}\right|_{u=-A} \le 0, \end{aligned} \tag{6}$$

Для оптимальных по времени линий переключения эти условия всегда выполняются [2], при этом одно из двух неравенств оказывается равенством. То есть скользящий режим оказывается на грани срыва. Причём это относится к любой точке линии переключений в пространстве ошибок.

Цифровая реализация оптимального регулятора. Далее управление (2) требуется реализовать с использованием цифрового регулятора. Такая реализация сопровождается двумя эффектами – дискретизацией времени и дискретизацией уровня.

Однако последней можно пренебречь, поскольку современные контроллеры имеют достаточно высокую разрядность, так что влияние дискретизации по уровню значительно меньше влияния погрешностей датчиков. А вот дискретизация времени сказывается значительно сильнее на характер движения. Таким образом, далее используется управление с квантованием по времени и непрерывным уровнем управляющего сигнала. Если непосредственно реализовать зависимость (2) в дискретном времени, в системе возникают нерегулярные колебания [4].

Для реализации следящей системы будем рассчитывать и подавать на вход системы такое управление, чтобы заставить фазовую точку системы попадать к началу следующего такта на линию переключения, реализуя тем самым практически скользящий режим. Такой режим движения назовём цифровым скользящим режимом. Рассмотрим три варианта реализации закона цифрового скользящего режима.

1. С использованием уравнений движения объекта управления и значений параметров системы;

2. С допущением, что изменение состояния системы за такт управления – линейная функция только управления, причём параметры этой функции мало изменяются от такта к такту;

3. С допущением, что изменение за такт состояния системы есть линейная функция текущего состояния системы и управления, причём параметры этой функции достаточно медленно меняются, чтобы можно было считать их постоянными на протяжении двух – трёх тактов.

В качестве модельного примера для численных иллюстраций методов будем использовать объект управления, структурная схема которого представлена на рис. 2. За меру точности (качество управления) примем среднеквадратичное отклонение выходного сигнала от входного в установившемся процессе слежения. В качестве входного сигнала будет использоваться некоторая типовая синусоида. Предсказание значений интересующих нас величин будем осуществлять экстраполяцией по первой производной. Параметры модели имеют следующие числовые значения:

$$K = 5;\ T = 0.0068;\ A = 24;\ dt = 0.0001;\ y(t) = 0.3 \cdot \sin(t).$$

Первый вариант. Воспользуемся следующим приёмом. Сформируем закон управления для автономной системы, при отсутствии входного сигнала, а при входном сигнале будем использовать в этом законе вместо переменных состояния ошибку.

Исходное состояние системы в момент времени t_k: $x_1(t_k)$, $x_2(t_k)$, $\sigma(t_k)$.В первом приближении состояние в следующий, k+1-й момент времени в соответствии с (3) и (5) окажется:

$$x_1(t_{k+1}) = x_1(t_k) + x_2(t_k) \cdot dt,$$

$$x_2(t_{k+1}) = x_2(t_k) + \left(\frac{K}{T} \cdot u(t_k) - \frac{1}{T} x_2(t_k) \right) \cdot dt,$$

$$\sigma(t_{k+1}) = \sigma(t_k) + \left(x_2(t_k) + \psi(x_2(t_k)) \cdot \left(\frac{K}{T} \cdot u(t_k) - \frac{1}{T} x_2(t_k) \right) \right) \cdot dt.$$

где dt – такт времени; $\psi(x_2) = \frac{d\phi(x_2)}{dx_2}$.Из требования равенства нулю $\sigma(t_{k+1})$ находим значение управления, заменив координату на ошибку:

$$u(t_k) = \frac{1}{K} \cdot \left(e_2(t_k) + \frac{T}{\psi(t_k)} \cdot \left(e_2(t_k) \cdot dt - \frac{\sigma(t_k)}{dt} \right) \right). \qquad (7)$$

Моделирование показало достаточно высокую точность слежения – среднеквадратичная ошибка в установившемся режиме составила 4e-7 или менее 0,0002 % амплитуды. Мгновенная ошибка не превышала 1e-6 или менее 0,0003 % амплитуды. При этом $\sigma(t)$ практически остаётся равной нулю, а управление оказывается гладким (см. рис. 3).

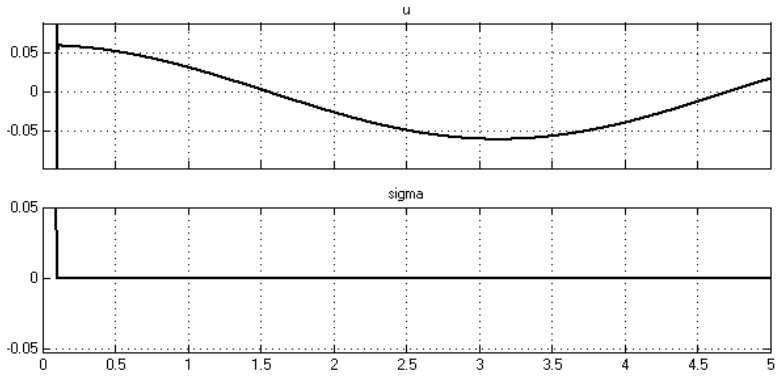


Рис. 3. Управляющий сигнал и функция переключения в режиме слежения. Первый вариант

Для вычисления управления по формуле (7) требуется только текущие значения ошибки и её первой производной. Однако в формулу (7) входят в явном виде параметры объекта управления, что не позволяет надеяться на инвариантность к этим параметрам.

Второй вариант. Он основан на предположении, что за один квант времени достаточно мало изменяется состояние как объекта в целом, так и значения управляющих величин, и можно изменение σ за такт достаточно точно предсказать по первому приближению. Это соображение позволяет рассчитывать на приблизительное выполнение равенств:

$$\frac{\sigma(t_{k+1})-\sigma(t_k)}{u(t_k)}=\frac{\sigma(t_k)-\sigma(t_{k-1})}{u(t_{k-1})}=\frac{\sigma(t_{k-1})-\sigma(t_{k-2})}{u(t_{k-2})},$$

откуда получается выражение для управления, содержащее некоторый элемент сглаживания,

$$B=2\cdot\frac{\sigma(t_k)-\sigma(t_{k-1})}{u(t_{k-1})}+\frac{\sigma(t_{k-1})-\sigma(t_{k-2})}{u(t_{k-2})},$$
$$u(t_k)=-3\cdot\frac{\sigma(t_k)}{B}. \qquad (8)$$

Моделирование с управлением (8) дало следующие результаты: среднеквадратичная ошибка в установившемся режиме составила 2.4e-6, 0,0008 % амплитуды, мгновенная ошибка не превышает 7e-6, 0,002 % амплитуды. При этом (рис. 4) управление, хотя и имеет колебательную составляющую, связанную с частотой квантования, амплитуда этих колебаний невелика и весьма далека от предельного значения управления A.

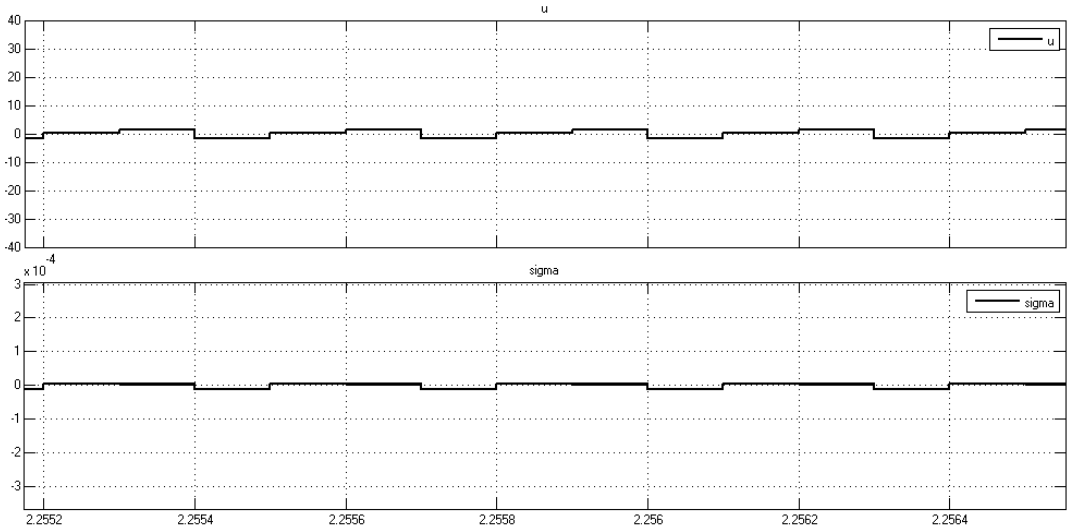


Рис. 4. Управление и функция переключений в режиме слежения. Второй вариант

Параметры объекта управления при вычислении управления не используются, используются только ошибка слежения и её производная в текущий и два предыдущих момента времени. Это позволяет надеяться на инвариантность системы к параметрам. Действительно, даже двукратное изменение постоянной времени T и коэффициента передачи K не привело ни к увеличению ошибки слежения, ни к изменению характера управляющего воздействия.

Третий вариант. Если во втором варианте использовалось предположение, что изменение значения функции переключений зависит только от величины управляющего сигнала, причём эта зависимость линейна, то в реальности дело обстоит иначе. Упомянутую зависимость, которую по-прежнему вполне обоснованно можно считать линейной, запишем в виде:

$$\sigma(t_{k+1})-\sigma(t_k)=C_1\cdot e_1(t_k)+C_2\cdot e_2(t_k)+C_3\cdot u(t_k).$$

Входящие в него коэффициенты C_1,C_2,C_3можносчитать достаточно медленно меняющимися со временем, практически постоянными на протяжении трёх интервалов дискретизации. Тогда должны быть справедливы равенства:

$$\begin{aligned} &C_1\cdot e_1(t_{k-1})+C_2\cdot e_2(t_{k-1})+C_3\cdot u(t_{k-1})=\sigma(t_k)-\sigma(t_{k-1}),\\ &C_1\cdot e_1(t_{k-2})+C_2\cdot e_2(t_{k-2})+C_3\cdot u(t_{k-2})=\sigma(t_{k-1})-\sigma(t_{k-2}),\\ &C_1\cdot e_1(t_{k-3})+C_2\cdot e_2(t_{k-3})+C_3\cdot u(t_{k-3})=\sigma(t_{k-2})-\sigma(t_{k-3}), \end{aligned} \qquad (9)$$

представляющие собой систему линейных алгебраических уравнений относительно вектора $C=(C_1,C_2,C_3)$, которую можно записать в матрично- векторной форме:

$$H\cdot C=B,$$

$$H=\begin{pmatrix} e_1(t_{k-1}) & e_2(t_{k-1}) & u(t_{k-1})\\ e_1(t_{k-2}) & e_2(t_{k-2}) & u(t_{k-2})\\ e_1(t_{k-3}) & e_2(t_{k-3}) & u(t_{k-3}) \end{pmatrix},\quad B=\begin{pmatrix} \sigma(t_k)-\sigma(t_{k-1})\\ \sigma(t_{k-1})-\sigma(t_{k-2})\\ \sigma(t_{k-2})-\sigma(t_{k-3}) \end{pmatrix}.$$

Решая эту систему, находим текущее значение вектора C, и вычисляем управление:

$$u(t_k)=-\frac{1}{C_3}(C_1\cdot e_1(t_k)+C_2\cdot e_2(t_{k-1})+\sigma(t_k)). \qquad (10)$$

Естественно было бы ожидать, что такое управление, также свободное от использования параметров объекта управления, покажет результаты лучше, чем во втором варианте. Однако моделирование дало противоположные результаты. Характер управления отражён на рис. 5. Среднеквадратическое отклонение составило 5e-5, то есть чуть меньше 0,02 % амплитуды, а мгновенная ошибка в отдельные моменты достигала 1.25e-3, или 0,4 % амплитуды. Управление содержит существенную нерегулярную составляющую с частотой квантования и достигает порой предельных значений. Почему прицеливание в линию переключений в третьем варианте оказалось таким неточным, предстоит разбираться в будущих исследованиях.

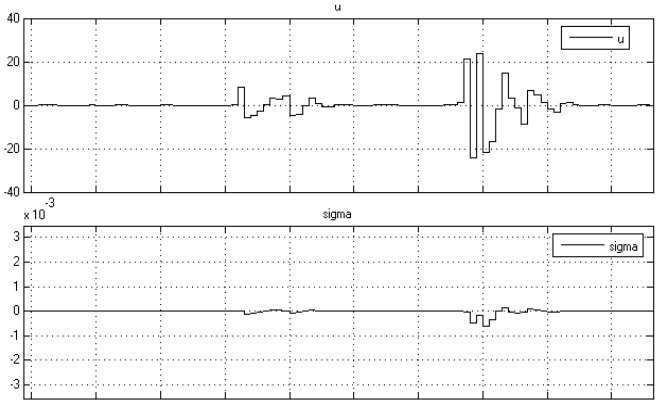


Рис. 5. Управление и функция переключений в режиме слежения. Третий вариант

Заключение. Проведённые исследования показали, что режим движения, названный нами «цифровой скользящий режим», заключающийся в том, чтобы на каждом такте цифрового управления постараться попасть на линию переключений, обладает всеми позитивными свойствами скользящего режима и позволяет создавать следящие системы, обеспечивающие высокую точность слежения за достаточно гладкими сигналами при практической инвариантности к параметрам объекта управления.

Список литературы

1. Фельдбаум А.А. Оптимальные процессы в системах автоматического управления // Автоматика и телемеханика, 1953, № 6. С. 712-768.

2. Иванов В.А., Фалдин Н.В. Теория оптимальных систем управления. М. Наука, 1981. 331 с.

3. Уткин В.И. Скользящие режимы и их применения в системах с переменной структурой. М. Наука, 1974. 272 с.

4. Феофилов С.В., Козырь А.В. Анализ периодических движений в цифровых автоколебательных системах управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19. № 8. С. 587-594.

Макаров Николай Николаевич, д-р техн. наук, профессор, octobrius@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Руднев Сергей Александрович, д-р техн. наук, профессор, octobrius@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Плыкина Екатерина Викторовна, инженер, octobrius@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

THE USE OF DIGITAL SLIDING MODE IN THE TRACKING DRIVE

N.N. Makarov, S.A. Rudnev, E.V. Plykina

The aim of the work is to create and compare different options for implementing the digital law of tracking drive management, combining high accuracy of tracking with low parametric sensitivity. A special mode of movement is defined - a digital sliding mode that provides movement on the surface of switches at discrete time.

Key words: tracking system, digital controller, optimal control, sliding mode.

Makarov Nikolay Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, octobrius@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Rudnev Sergey Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor, octobrius@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Plykina Ekaterina Viktorovna, engineer, octobrius@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 62-83

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСКОНТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

А.А. Судаков

Проведен анализ работы некорректированного стенда с двухфазным бесконтактным электрическим двигателем. Выбрана структура автоматизированного стенда. Разработаны математические модели различной сложности. Рассмотрен вариант синтеза методом АКОР (аналитическое конструирование оптимальных регуляторов). Применен матричный метод синтеза детерминированной дискретной системы управления при наличии полной информации о векторном состоянии объекта управления.

Ключевые слова: мехатронный модуль, математическая модель, синтез системы управления.

К статическим и динамическим характеристикам мехатронных модулей перспективных изделий предъявляются жесткие, а порой и противоречивые, требования. Возможность выполнения совокупности предъявляемых требований зависит от ряда факторов, к важнейшим из которых относятся структура системы управления и выбранных информационных и исполнительных элементов мехатронного модуля.

Для экспериментальной отработки алгоритмов управления необходимо располагать автоматизированным нагрузочным стендом, включающим в себя рассматриваемый тип силовой системы привода и универсальное цифровое вычислительное устройство, позволяющее оперативно корректировать структуру и параметры алгоритмов управления.

Для реализации такой отработки была разработана функциональная схема автоматизированного стенда. Она представляет выбранные компоненты и их взаимосвязи между друг другом рис. 1.

Рассматриваемый стенд представляет собой мехатронный модуль, состоящий из следующих устройств:

исполнительный двигатель (ИД) серии ДБМ;

синусно-косинусный вращающийся трансформатор (СКВТ), с передаточным механизмом, выполняющий функции датчика угла поворота ротора двигателя или функции задатчика управляющего синусно-косинусного сигнала, необходимого для питания обмоток двигателя;

потенциометр прецизионный - датчик обратной связи (П);

электронный блок управления (ЭБУ);

редуктор представляет собой зацепление зубчатого колеса, находящегося на вале ИД с зубчатым колесом СКВТ, находящимся на роторе.

Для реализации автоматического управления стенда, проводится анализ и синтез системы, рассчитывается вектор коэффициентов K_AKOR, для корректирующего звена, чтобы система стала управляемой. В скорректированной системе определяются все компоненты вектора состояния *x[k]*, чтобы получить матрицы управления *A* и *B*. Преобразуются матрицы *A* и *B* с помощью каноничной формы управляемости, где рассчитываются элементы вектора регулятора *K*, при уже определенном такте квантования дискретной системы и времени отклика.

В качестве подаваемого входного управляющего сигнала, на автоматизированный стенд, выбран ступенчатый и синусоидальный:

входной ступенчатый сигнал 0,1 рад, а время регулирования не превышало 0,1 с;

отработка входного синусного сигнала с амплитудой 0,1 за время регулирования 0,1 с, при частоте 3*2*π Гц;

перерегулирование не более 10 %;

системы моделей: базовая и идеализированная.

Идеализированная модель - где рассматривается двигатель с идеальной обратной связью.

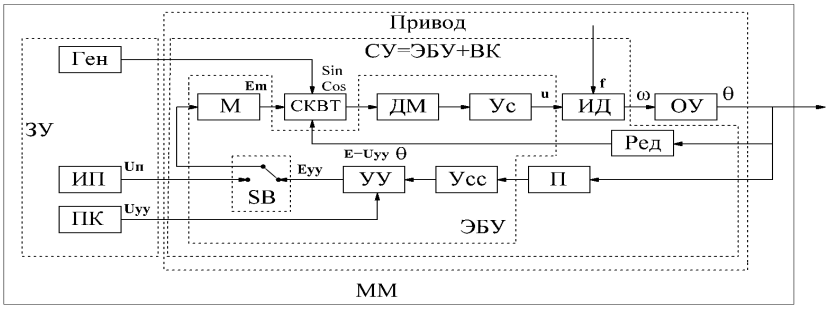


Рис. 1. Функциональная схема автоматизированного стенда: ЗУ - задающие устройства; Ген – генератор; ИП – источник питания; ПК – персональный компьютер; М – модулятор; SB – ключ переключения режимов работы (ручной); УУ – управляющие устройство типа регулятор; ДМ – демодулятор; Ус – усилитель; ОУ – объект управления (поворот вала); СУ – система управления; Ред - редуктор; ВК - внешний контур

Базовая модель - где используются все компоненты, перечисленные в функциональной схеме автоматизированного стенда.

1. Моделирование мехатронного модуля и получение характеристик без корректирующего звена. Моделируем систему мехатронного модуля сначала идеализированную, где описывается мехатронный модуль без датчиков обратной связи типа СКВТ и потенциометра прецизионного, а обратная связь моментальная и не имеет потери качества сигнала. Потом моделируем систему автоматизированного стенда рис. 1, где учитываются их свойства.

Промоделировав две системы рис. 2, с обратной связью для получения выходных характеристик по заданному углу. При управляющем линейным сигнале 0,1 рад/с и потом при управляющем синусоидальным сигнале амплитудой 0,1 и частотой 3*2*π.

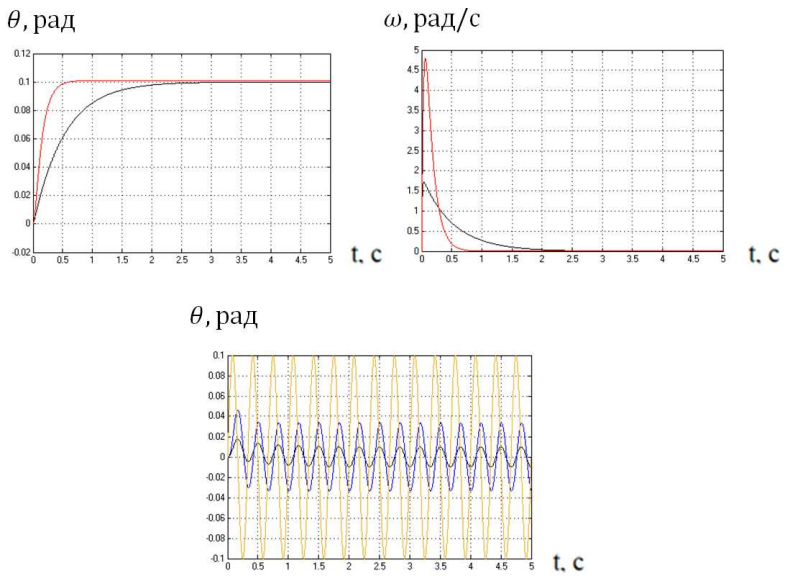


Рис. 2. Сравнение двух моделей по характеристика базовая идеализированная модель

По углу модель базовая выходит на заданный угол быстрее, чем идеализированная, а по синусному сигналу обе модели имеют большую ошибку, как по амплитуде, так и по частоте.

2. Синтез системы корректирующего устройства методом АКОР. Для решения поставленной задачи рассчитаны вектор линейной системы в пространстве состояния и решение уравнения Риккати, при помощи программы Matlab. Полученные коэффициенты:

k_p1=116.7938; k_i1=1.0600; k_d1=0.9655.

Выходные характеристики модели с корректирующим устройством по углу и частотные характеристики рис. 3.

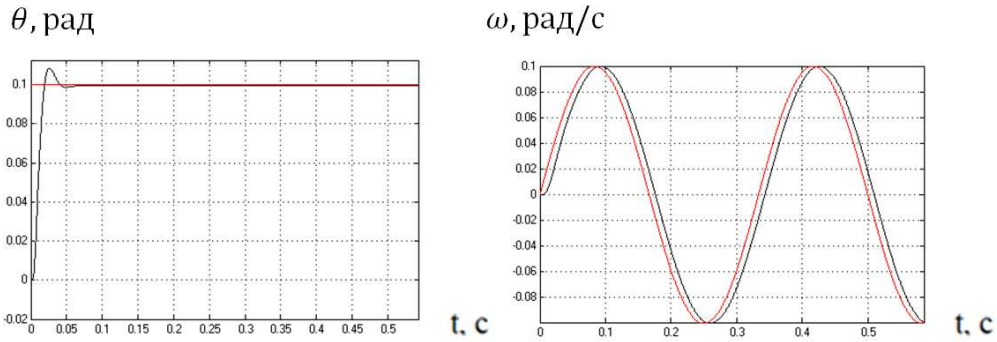


Рис. 3. Характеристики скорректированной системы

В ходе моделирования скорректированной системы, отработка входного сигнала стала качественной по перерегулированию, амплитуде и быстродействию.

3. Получение элементов вектора регулятора K. Расчет компонентов вектора состояния x[k] и преобразование с помощью каноничной формы управляемости, с помощью программы Matlab .

Получим матрицы объекта управления:

A = 0.9917 0.0009 0.0001; -19.8297 0.7378 0.1225; -45.0075 -0.6137 -0.0561.

B = 0.0083; 19.8297; 45.0075.

Получим вектор регулятора K с применением каноничной формы управляемости:

K = -36.7821 -0.0527 -0.0071.

Получим характеристики системы (рис. 4).

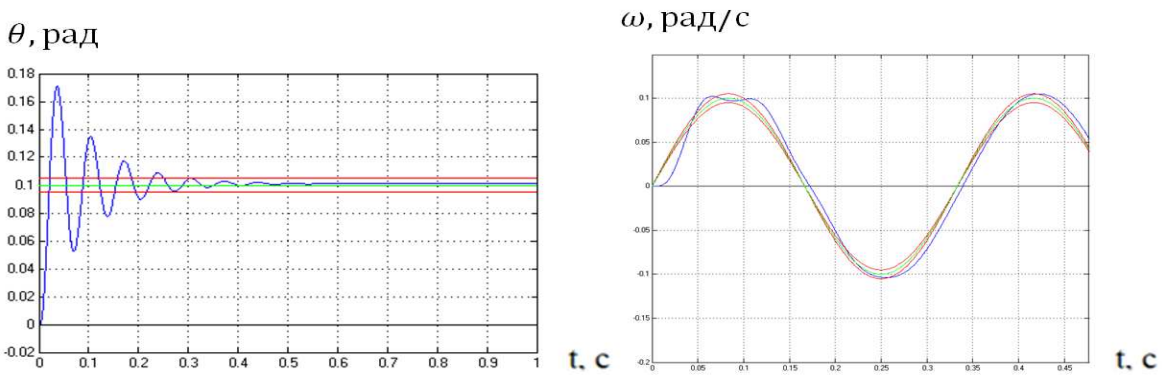


Рис. 4. Характеристики системы с регулятором

По полученным характеристикам видно, что система получила долгий переходный процесс при отработке ступенчатого сигнала, но при отработке синусного сигнала система имеет минимальное запаздывание.

Для того чтобы переходный процесс в системе стал меньше и перерегулирование стало в пределах 10 %, рассчитаем передаточную функцию корректирующего звена АКОР: s=tf('s'); K01=116.7938; K02=1.0600; K03=0.9655; W2s=K01-K02/s-K03*s; Ws =(-0.9655 s^2 + 116.8 s - 1.06)/ S.

Отрегулируем передаточную функцию и рассчитаем новые матрицы объекта управления (рис. 5)

A = 0.9434 0.0009 0.0002; -141.5145 0.8053 0.2332; -349.9742 -0.6556 0.0720.

B = 0.0566; 141.5145; 349.9742.

Получим вектор регулятора К с применением каноничной формы управляемости:

K = 3.6861 -0.0072 0.0017.

Сравним скорректированные системы с системами без корректирующих модулей (рис. 5).

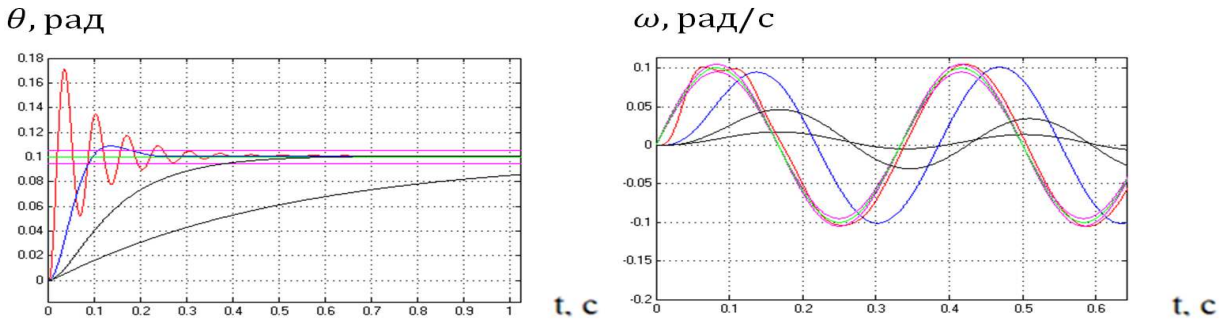


Рис. 5. Сравнение систем, получение характеристик, где зеленая характеристика входной сигнал, фиолетовые +5% и -5% входного сигнала, черные - идеализированная модель и модель мехатронного модуля, красная – система с высокой колебательностью, синяя - финальная

Как видно из характеристик, перерегулирование менее 10 %, составляет 0,107 рад. Время регулирования менее 0,1 с, составляет 0,09 с. При подаче на вход синусоидального сигнала присутствует задержка по фазе менее 01 с. секунды, составляет 0,09 с.

В настоящей работе решены следующие задачи:

Применен синтез методом АКОР.

Получен вектор регулятора К с помощью каноничной формы управляемости, что позволит перейти к автоматизированному управлению стендом.

Проведено моделирование системы и получены точностные и динамические характеристики стенда.

Проведен сравнительный анализ характеристик стенда.

Отработаны управляющие сигналы:

отработан входной ступенчатый сигнал 0,1 рад за время регулирования 0.1 с;

отработан входной синусный сигнал с амплитудой 0,1 за время регулирования 0,1 с, при частоте 3*2*π Гц;

перерегулирование не более 10 %.

Список литературы

1. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. 2-е издание, исправленное Москва Издательский центр «Академия», 2007. 272 с.

2. Ким Д.П. Сборник задач по теории автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. Учебное пособие, Издательство «М.:ФИЗМАТЛИТ», 2008. 328 с.

3. Герман-Галкин С.Г. MATLAB & SIMULINK проектирование мехатронных систем на ПК. Учебное пособие для вузов. Издательство Корона-Век Санкт-Петербург, 2017. 368 с.

4. Кудинов Ю.И., Пащенко Ф.Ф. Теория автоматического управления (с использованием MATLAB – SIMULINK). Учебное пособие. Издательство «Лань», 2016. 256 с.

Судаков Анатолий Анатольевич, студент, anatolijj-sudakov@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

AUTOMATED STAND FOR RESEARCH OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF CONTACTLESS DC MOTORS

A.A. Sudakov

The operation of an uncorrected stand with a two-phase contactless electric motor is analyzed. The structure of the automated stand is selected. Mathematical models of various complexity have been developed. A variant of synthesis by the ACOR method (analytical design of optimal regulators) is considered. The matrix method of synthesis of a deterministic discrete control system is applied in the presence of complete information about the vector state of the control object.

Key words: mechatronic module, mathematical model, synthesis control system.

Sudakov Anatoly Anatolyevich, student, anatolijj-sudakov@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 62-51

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В СИСТЕМАХ НАВЕДЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ

О.В. Горячев, А.О. Степочкин

Рассмотрены особенности применения шагового электродвигателя гибридного типа при реализации электрического привода наведения и стабилизации, определяемые наличием резонансных явлений в его силовой системе. Представлен алгоритм управления исполнительным двигателем, позволяющий исключить соответствующие резонансные явления. Разработан векторный регулятор момента шагового двигателя с использованием алгоритма наблюдения скорости и угла поворота, позволяющий реализовать заданные требования по точности.

Ключевые слова: система наведения и стабилизации, гибридный шаговый двигатель, резонансные явления в силовой системе привода, векторный регулятор, наблюдатель скорости и положения.

В настоящее время системы электропривода наведения и стабилизации (ЭПНС), как правило, реализуются на базе моментных исполнительных двигателей с использованием датчиков скорости и углового положения. Применение, в качестве исполнительного, шагового двигателя, вместо моментного, позволит увеличить надежность и снизить общую стоимость системы за счет сокращения элементного состава привода, путем отказа от датчиков скорости и углового положения. Среди существующих типов шаговых двигателей выделим гибридный шаговый двигатель (ГШД), который по совокупности

характеристик более других подходит для использования в качестве исполнительного для систем ЭПНС. Однако, при разработке соответствующей системы управления исполнительным двигателем такого типа необходимо учитывать особенности данных электрических машин такие как дискретность изменения угла поворота в номинальном режиме работы и резонансные явления, возникающие при совпадении частоты питающего напряжения обмоток статора ГШД с собственной частотой колебаний электромеханической системы машины, вызывающие падение величины развиваемого двигателем момента и пропуск шагов. Для их устранения при реализации управления приводом, как правило, применяется режим дробления шага (микрошаговый режим работы ГШД), для которого характерны такие недостатки как снижение максимальной мощности и скорости исполнительного двигателя, а также повышенное тепловыделение обмоток статора.

Наиболее предпочтительным с точки зрения динамических и энергетических характеристик режимом работы ГШД является полношаговый режим, при котором точность слежения ЭПНС существенно ограничена величиной шага. Рассмотрим вариант реализации системы управления ЭПНС с осуществлением программного управление ГШД по разомкнутому контуру в полношаговом режиме, с возможностью переключения в режим управления с обратной связью по скорости и положению на основе наблюдателей состояния для осуществления перемещений в области менее величины одного шага. Алгоритм переключения при этом обеспечивает расчет в реальном времени заданного углового перемещения ротора ГШД и сравнение его с требуемой величиной перемещения $\theta_{вход}$. Выделим соответствующие режимы работы ЭПНС на основе ГШД:

режим переброса (для осуществления заданных перемещений нагрузки $\Delta\theta \geq h$);

режим слежения (для осуществления заданных перемещений нагрузки $\Delta\theta < h$).

Обобщенная функциональная схема привода с заданным условием переключения управления представлена на рис. 1.

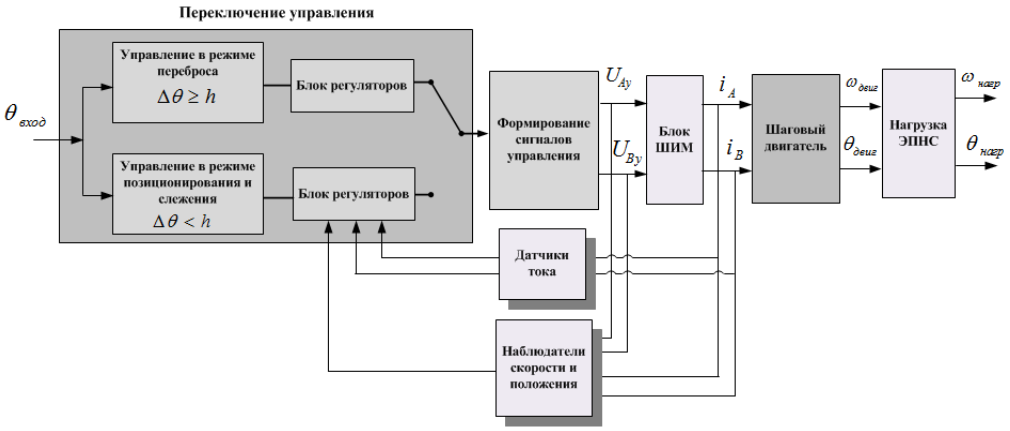


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема ЭПНС на основе ГШД с переключением управления

На рис. 1: h – величина шага ГШД; $\theta_{вход}$ – заданное значение угла поворота объекта управления; $\theta_{дв}$ – угол поворота двигателя; $\theta_{дв}^{**}$ – сигнал с наблюдателя угла поворота двигателя; $\omega_{дв}$ – скорость двигателя; $\omega_{дв}^{**}$ – сигнал с наблюдателя скорости двигателя; U_{Ay} – входной сигнал управления ШИМ фазы А; U_{By} – входной сигнал управления ШИМ фазы В; i_A – ток в обмотке фазы А двигателя; i_B – ток в обмотке фазы В двигателя; $i_A{}^*$ – сигнал с датчика тока фазы А; $i_B{}^*$ – сигнал с датчика тока фазы А;

ξ_θ – ошибка слежения позиционного контура привода; ξ_ω – ошибка слежения скоростного контура привода; ξ_{iA}, ξ_{iB} – ошибки контуров регулирования тока в фазах двигателя. Рассмотрим отдельно каждый из представленных режимов.

Работа ГШД системы ЭПНС при перебросе выполняется в полношаговом режиме без использования дробления шага, что позволяет выполнить отработку заданного значения $\theta_{вход}$ с максимальным быстродействием и минимальными энергетическими затратами. При вхождении $\theta_{вход}$ в зону, ограниченную величиной шага $-\Delta\theta < h$, происходит переключение в режим слежения, точность работы в котором достигается путем подключения в контур управления векторного регулятора, согласно схеме реализованных в структуре «блок регуляторов». ГШД привода приводится во вращение серией импульсов, частота и количество которых определяют заданные скорость вращения и угол поворота. При этом используется программный алгоритм управления – движение с постоянной скоростью [3].

Для выполнения требований технического задания необходимо обеспечить устойчивую работу исполнительного двигателя во всём диапазоне рабочих частот для чего необходимо минимизировать, либо полностью устранить падение величины развиваемого момента и пропуск шагов ГШД вызванные резонансными явлениями в двигателе. В рамках данной работы для борьбы с резонансом предлагается использовать разработанный авторами способ коммутации обмоток ГШД [6] в режиме полного шага, а для расчета необходимых при его реализации величин резонансных частот была сформирована математическая модель шагового двигателя с учетом конструктивных параметров, свойств конструкционных материалов и параметров обмоток [4], с помощью которой получена расчетная механическая характеристика ЭПНС. Анализ расчетной механической характеристики, показал наличие 2-х резонансных частот, значения которых совпадают с экспериментальными. Соответственно, при достижении частотой коммутации данных значений будет наблюдаться пропуск шагов, что недопустимо при разработке систем ЭПНС, и для данной области в диапазоне частот от 100 до 320 Гц используется разработанный способ коммутации обмоток исполнительного двигателя, позволяющий устранить это явление.

Таким образом, для работы ЭПНС в режиме переброса предложены способы управления ГШД для области номинальных и резонансных частот.

Для решения задачи слежения с необходимой точностью при заданных угловых перемещениях менее величины одного шага ГШД применяется система векторного управления током статора с реализацией обратных связей по положению и скорости при помощи алгоритмов наблюдения соответствующих переменных состояния. При формировании системы управления исходим из того, что шаговый двигатель гибридного типа представляет собой синхронную электрическую машину с постоянными магнитами на роторе, и, следовательно, для данного типа исполнительных двигателя может применяться соответствующая типовая структура систем замкнутого электропривода на основе синхронного двигателя [2]. Структурно-функциональная схема реализации метода векторного управления, применительно к заданной структуре ЭПНС на основе ГШД представлена на рис. 2.

Для разработки структуры векторного регулятора используется математическую модель ГШД [5] и известные выражения координатных преобразования Парка [2]. Средствами векторного управления формируется электромагнитный момент ГШД, на основе взаимосвязанного изменения мгновенной фазы и амплитуды тока статора, в соответствии с которым по требуемому закону изменяется мгновенная величина и пространственное положение магнитного поля в двигателе. Однако, на основе анализа результатов моделирования полученной структуры ЭПНС в пакете Simulink сделан вывод,

что для выполнения требований технического задания необходимо использовать дополнительное корректирующее устройство. В работе рассмотрен вариант реализации ПИД-регулятора, синтезированного с помощью частотных методов [7]. Соответствующее цифровое корректирующее устройство разрабатывается на основе полученного аналогового прототипа.

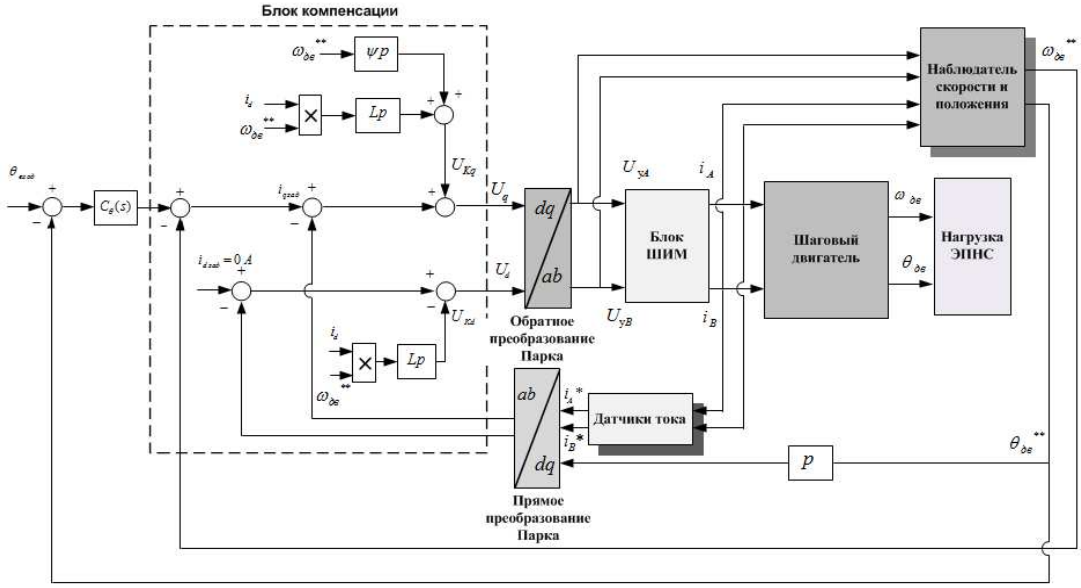


Рис. 2. Структурно-функциональная схема реализации метода векторного управления в ЭПНС на основе ГШД

На рис. 2: $\theta_{вход}$ – заданное значение угла поворота объекта управления; $\theta_{дв}$ – угол поворота двигателя; $\theta_{дв}^{**}$ – сигнал с наблюдателя угла поворота двигателя; $\omega_{дв}$ – скорость двигателя; $\omega_{дв}^{**}$ – сигнал с наблюдателя скорости двигателя; U_{Ay} – входной сигнал управления ШИМ фазы А; U_{By} – входной сигнал управления ШИМ фазы В; i_{A} – ток в обмотке фазы А двигателя; i_{B} – ток в обмотке фазы В двигателя; i_{A} * – сигнал с датчика тока фазы А; i_{B} * – сигнал с датчика тока фазы А; U_{d} – напряжение по оси d; U_{q} – напряжение по оси q; U_{d} – напряжение по оси d; U_{q} – напряжение по оси q; U_{Kd} – напряжение компенсации по оси d; U_{Kq} – напряжение компенсации по оси q.

Тип и структура наблюдателя состояния предложены в соответствии с классификацией, представленной в [1], а именно, исходя из заданной структуры и количества известных параметров, для реализуемой системы ЭПНС может быть использован адаптивный наблюдатель скорости на основе математической модели ГШД, рассмотренной в [5], а величина угла поворота оценивается по интегралу оценки скорости. Simulink-модель контура слежения с векторным управлением и ПИД-регулятором представлена на рис. 3.

Алгоритм векторного управления ИД ЭПНС формируется на основе уравнений и графически представлен на Рис. 2. В полученной имитационной модели функционал векторного регулятора реализован в подсистемах: «Блок перекомпенсации», «Преобразование Парка прямое» и «Преобразование Парка обратное». Структура блоков, в которых осуществляются преобразования Парка соответствует его математическому описанию, показанному в [1]. Подсистема «Блок перекомпенсации» представлена на рис. 4.

Структура блока «Наблюдатель скорости и положения» представлена на рис. 5.

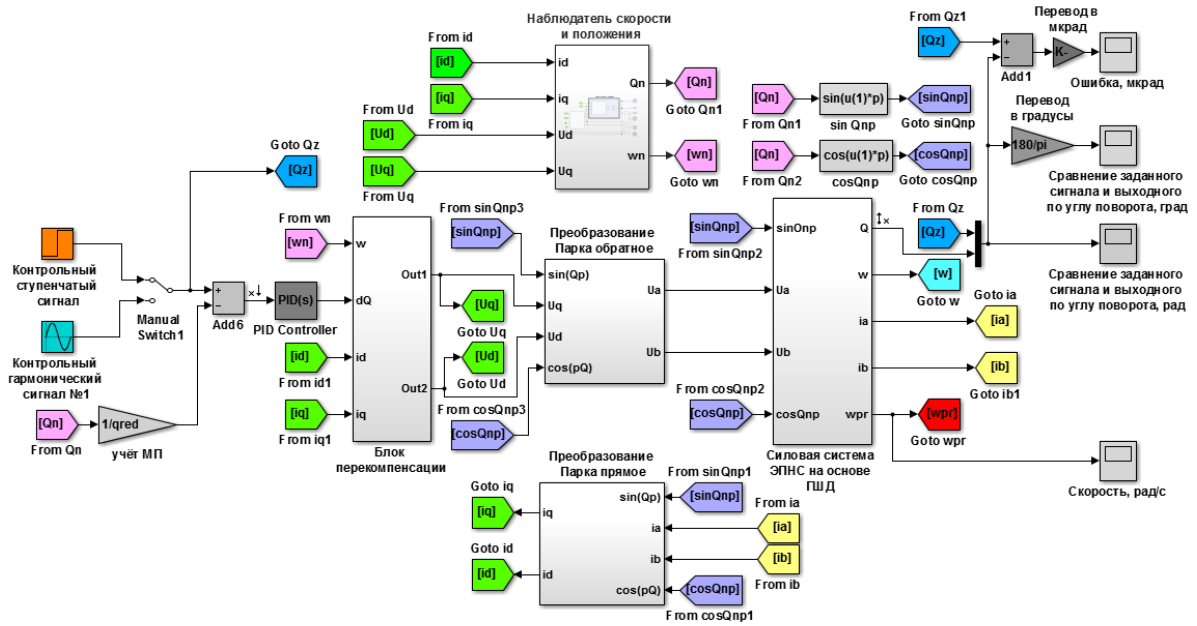


Рис. 3. Simulink-модель ЭПНС с векторным управлением и ПИД-регулятором

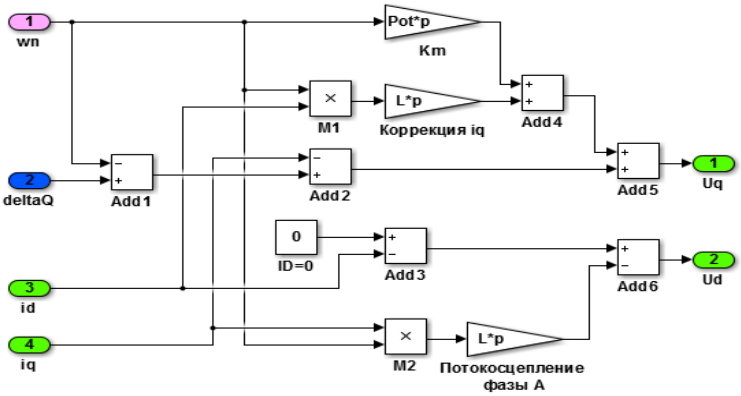


Рис. 4. Структура подсистемы «Блок перекомпенсации»

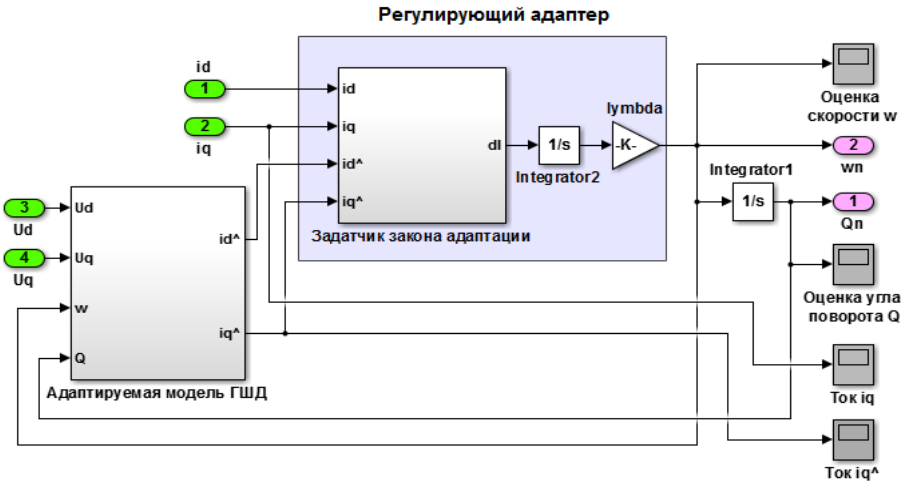


Рис. 5. Структура подсистемы «Наблюдатель скорости и положения»

Структура блока «Адаптируемая модель ГШД» полностью соответствует Simulink-модели ГШД, рассматриваемой в [5]. Структура блока «Задатчик закона адаптации», представлена на рис. 6. Его математическое описание подробно рассмотрено в [1].

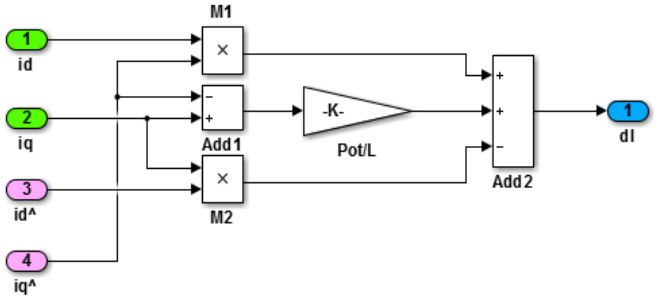


Рис. 6. Структура подсистемы «Задатчик закона адаптации»

Для анализа качества реализации алгоритма наблюдения рассмотрим работу модели ЭПНС при отработке контрольного ступенчатого воздействия. Рассмотрим переходные процессы по току i_q, скорости и углу поворота ИД и их соответствующим оценкам, представленные на рис. 7-9.

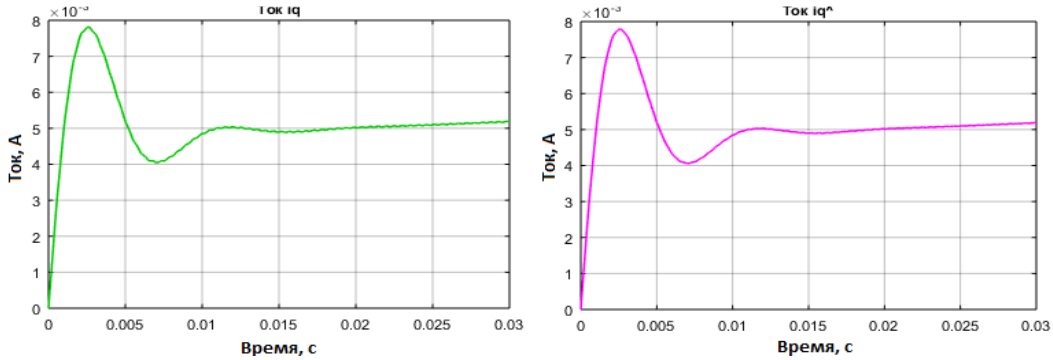


Рис. 7. Ток i_q и его оценка $\hat{i}_q$

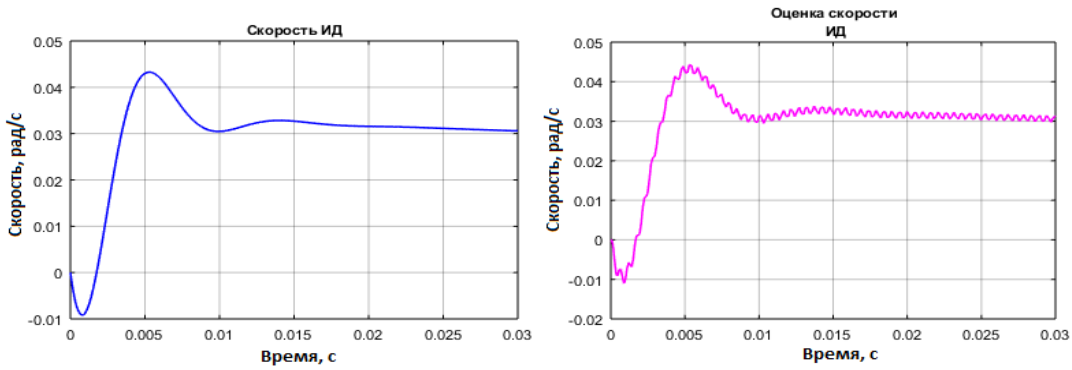


Рис. 8. Скорость ИД ω и её оценка ω_n

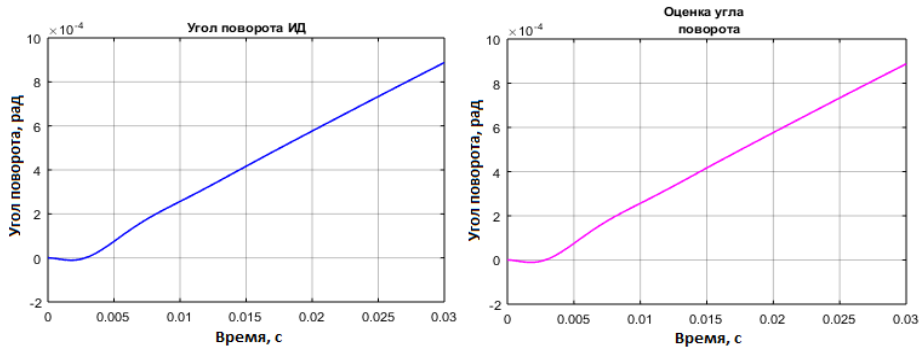


Рис. 9. Угол поворота ИД θ и его оценка θ_n

Сравнительный анализ расчетных характеристик показывает их практически полную идентичность. Следовательно, можно сделать вывод о корректности предложенного алгоритма наблюдения и целесообразности его применения при реализации ЭПНС на основе ГШД без использования датчиков скорости и положения.

На рис. 10 – 11 представлены результаты моделирования отработки ЭПНС на основе ГШД входного ступенчатого сигнала и динамической ошибки слежения.

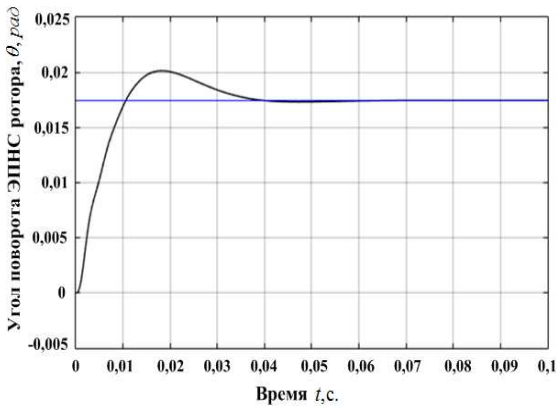


Рис. 10. Отработка ступенчатого входного сигнала

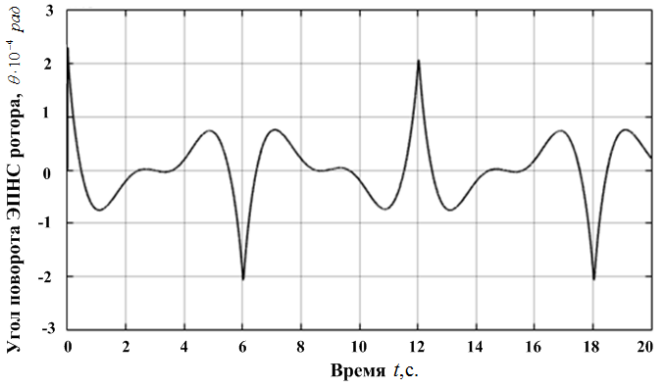


Рис. 11. Динамическая ошибка слежения при отработке гармонического сигнала

Анализ представленных переходных процессов показывает, что скорректированная система ЭПНС в режиме слежения удовлетворяет требованиям по статической и динамической точности, а также показателям качества переходного процесса, предъявляемых к следящим системам электропривода различного функционального назначения. Таким образом, можно сделать вывод о возможности реализации системы ЭПНС на основе ГШД с 2-х режимным переключением управления, векторным регулятором момента и наблюдателем скорости и положения, характеристики которой будут удовлетворять заданным требованиям, несмотря на специфические особенности применяемого исполнительного двигателя.

Список литературы

1. Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. М., 2015. 81 с.

2. Калачев Ю.Н. Векторное управление (заметки практика). М., 2013. 63 с.

3. Карпенко Б.Г. Шаговые электродвигатели. Киев: Техника, 1972. 216 с.

4. Волков С.В., Горячев О.В., Ефромеев А.Г., Степочкин А.О. Расчет параметров математической модели электрического шагового двигателя гибридного типа на основе анализа картины магнитостатического поля // Мехатроника, автоматизация и управление. Том 20. № 8. 2019. С. 482-489.

5. Степочкин А.О. Моделирование работы шагового электрического двигателя гибридного типа в пакете Simulink // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 8. С. 308-315.

6. Патент: 2708380 РФ. Способ управления 2-фазным шаговым электрическим двигателем. МПК H02P 8/22 / Горячев О.В., Ефромеев А.Г., Морозов О.О., Степочкин А.О. Заявл. 2019.03.12. Опубл. 2019.12.06.

7. O' Dwyer A. Handbook of PI and PID controller tuning rules, 3nd Edition. London: Imperial College Press, 2009. 623 p.

Горячев Олег Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, olegvgor@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Степочкин Александр Олегович, преподаватель, s.a.o.1984@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

FEATURES OF APPLICATION OF THE STEPPER MOTOR IN GUIDANCE AND STA-BILIZATION SYSTEMS

O.V. Goryacev, A.O. Stepochkin

The features of using a hybrid-type stepper motor in the implementation of an electric guidance and stabilization drive, determined by the presence of resonance phenomena in its power system, are considered. An algorithm for controlling the executive motor is presented, which makes it possible to exclude the corresponding resonance. A vector torque regulator of a stepper motor has been developed using an algorithm for observing the speed and angle of rotation, which makes it possible to implement the specified accuracy requirements.

Key words: guidance and stabilization system, hybrid stepper motor, resonance in the drive power system, vector controller, speed and position observer.

Goryachev Oleg Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, olegvgor@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Stepochkin Alexander Olegovich, lecturer, s.a.o.1984@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 62-551.45

СИНТЕЗ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ВЫСОКОДИНАМИЧНОГО ПРИВОДА СИСТЕМЫ ДОСТАБИЛИЗАЦИИ

С.С. Сафонова, О.В. Горячев

В данной работе рассмотрен синтез корректирующего алгоритма для высокодинамичного электрического следящего привода системы достабилизации: методом глубокой отрицательной обратной связи получено параллельное корректирующее устройство; для улучшения качества переходного процесса введен последовательный пропорционально-дифференциальный регулятор; выведена цифровая реализация в среде Matlab корректирующего алгоритма, объединяющего фильтры.

Ключевые слова: синтез, корректирующий алгоритм, метод глубокой отрицательной обратной связи, пропорционально-дифференциальный регулятор, фильтр.

В связи с ужесточением требований к приводам, применяемым в перспективных комплексах, задачи развития методов их проектирования и, следовательно, синтеза алгоритмов управления ими являются актуальными.

Синтез сводится к определению структуры и параметров корректирующего устройства, которое необходимо добавить к имеющейся неизменяемой части системы, чтобы обеспечить требуемые динамические свойства системы автоматического управления. Из полученных передаточных функций фильтров выводят конечно-разностные уравнения. На их основе получают корректирующий алгоритм, который в дальнейшем можно реализовать на подходящем языке программирования.

В качестве базового метода синтеза корректирующего алгоритма для высокодинамичного привода системы достабилизации с двигателем EC-20 flat выбран метод глубокой отрицательной обратной связи.

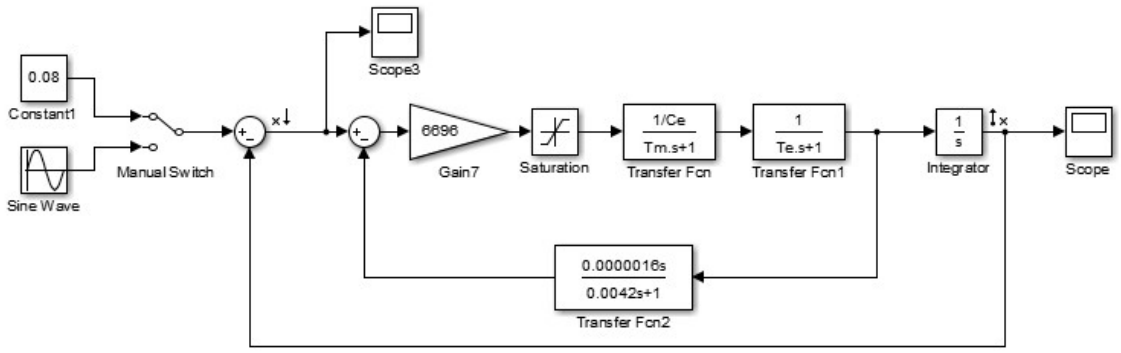
Основными требованиями технического задания к приводу: время регулирования 0,1 с., перерегулирование 10 %, динамическая ошибка 0,05 мрад.

При коррекции методом глубокой отрицательной обратной связи в структуру системы добавляется вторая отрицательная обратная связь, которая содержит параллельное корректирующее устройство. При формировании передаточной функции обратной связи нужно учитывать, что в полосе частот, близкой к частоте среза, должно выполняться условие:

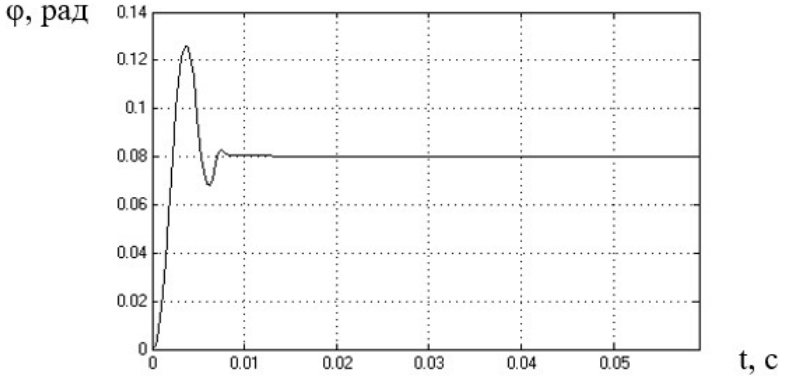
$$W_{\text{o}}W_{\text{oc}} >> 1,$$

где W_{o} - передаточная функция объекта управления; W_{oc} - передаточная функция обратной связи.

Так же введение обратной связи не должно изменять порядок астатизма системы и ее добротность. Порядок синтеза: построение асимптотической ЛАЧХ нескорректированной системы; выбор передаточной функции обратной связи и построение ЛАЧХ ее обратной характеристики $1/W_{oc}$; построение результирующей ЛАЧХ скорректированной системы по правилу нижней характеристики; определение параметров корректирующего устройства.



а



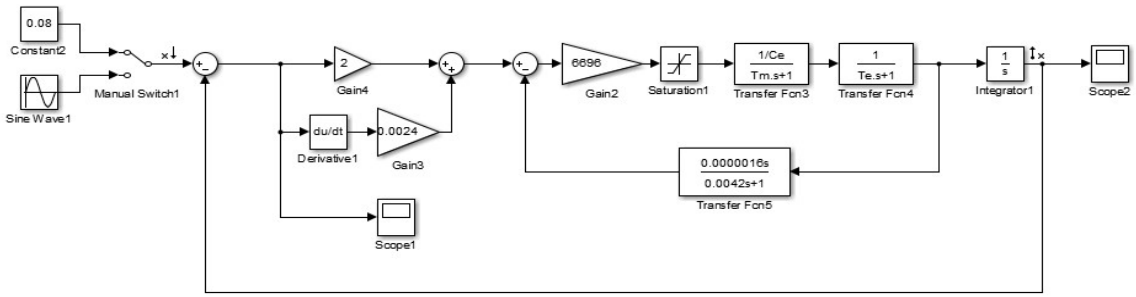
б

Рис. 1. Алгоритм структурной схемы модели в среде Simulink пакета Matlab (а); переходный процесс системы по углу (б)

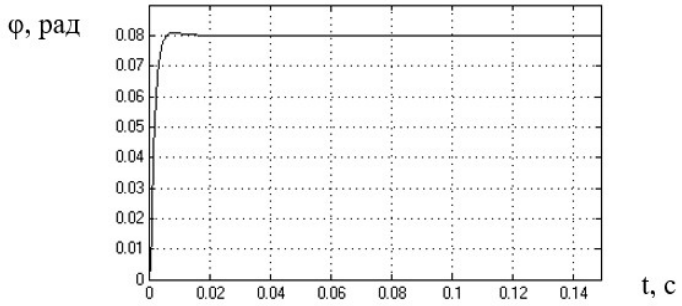
На основании изложенного порядка синтеза рассчитана передаточная функция корректирующего устройства, добавляющегося во вторую отрицательную обратную связь, для упрощенной эквивалентной модели двигателя постоянного тока. Полученная структурная схема модели в среде Simulink пакета Matlab и переходный процесс системы по углу показаны на рис.1.

Как видно из переходного процесса, параллельной коррекции не достаточно, чтобы добиться хороших динамических показателей системы. Так, перерегулирование здесь составляет 57,5 %, что не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к приводу.

С целью обеспечения заданных показателей качества переходного процесса предложена методика расчета последовательного корректирующего устройства, в соответствии с которой определены параметры последовательного пропорционально-дифференциального регулятора. Сформированная структурная схема модели в среде Simulink пакета Matlab и переходный процесс системы по углу представлены на рис. 2.



а



б

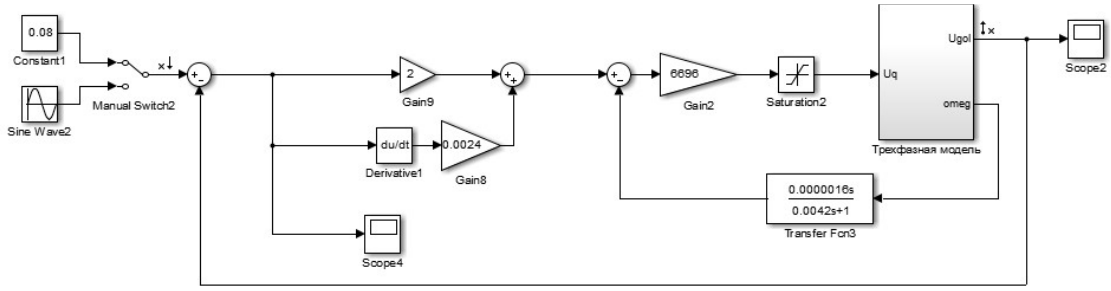
Рис. 2. Методика расчета последовательного корректирующего устройства: а – структурная схема модели в среде Simulink пакета Matlab; б – переходный процесс системы по углу

Видно, что перерегулирование системы заметно уменьшилось. Теперь оно составляет 1,125%, что удовлетворяет заданным требованиям, что позволяет сделать вывод о работоспособности предложенной методики.

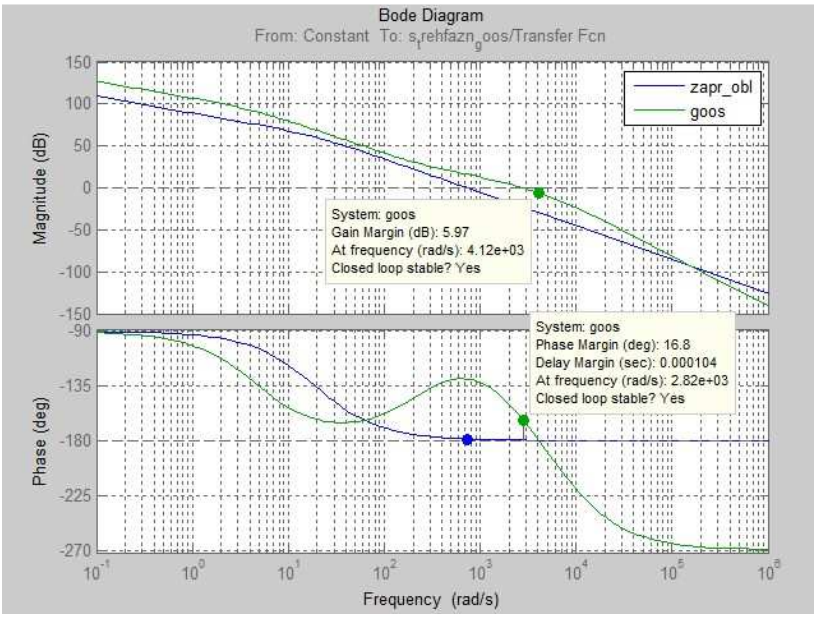
С целью подтверждения полученных результатов синтеза разработана и реализована в среде Simulink пакета Matlab математическая модель привода с уточненной математической моделью синхронного трехфазного двигателя. Разработанный вариант структурной схемы в среде Simulink пакета Matlab, а так же логарифмические амплитудно-фазовые частотные характеристики (ЛАФЧХ) системы показаны на рис. 3.

Как видно на рис. 3, полученная логарифмическая амплитудная частотная характеристика (ЛАЧХ) лежит выше запретной области, но запасы устойчивости ЛАФЧХ малы: по амплитуде 5,97 дб, по фазе 16,8°.

Чтобы увеличить запасы устойчивости и с учетом особенностей реализации дифференцирующего звена, изменены параметры и вид пропорционально-дифференциального регулятора. Полученная структурная схема в среде Simulink пакета Matlab и ЛАФЧХ системы с обновленной коррекцией показаны на рис. 4.



а



б

Рис. 3. Структурная схема логарифмической амплитудной частотной характеристики (ЛАЧХ) с обновленной коррекцией: а – структурная схема модели в среде Simulink пакета Matlab; б – ЛАФЧХ системы

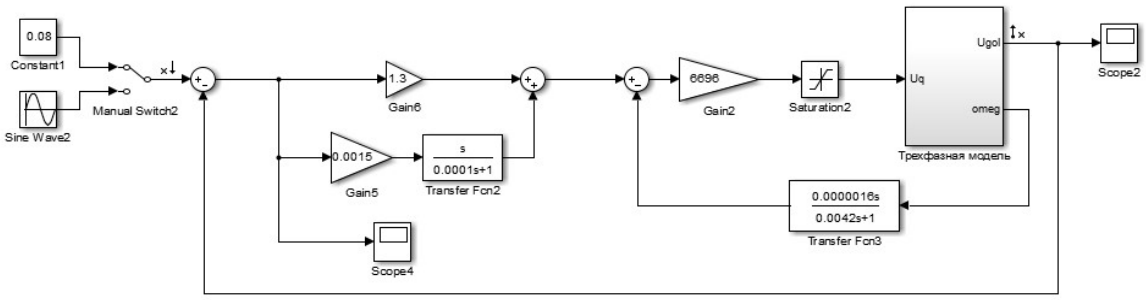
Как видно на рис. 4, полученная ЛАЧХ лежит выше запретной области, а запасы устойчивости ЛАФЧХ увеличились: по амплитуде 8,49 дб, по фазе 35,5°, что лучше, чем предыдущие показатели, для обеспечения качества работы системы. Следовательно, для выведения корректирующего алгоритма выбран последний вариант структурной схемы модели.

Преобразование передаточных функций регуляторов к алгоритму коррекции произведено с помощью специальных функций Matlab и на основе объединения конечно-разностных уравнений последовательного и параллельного фильтров.

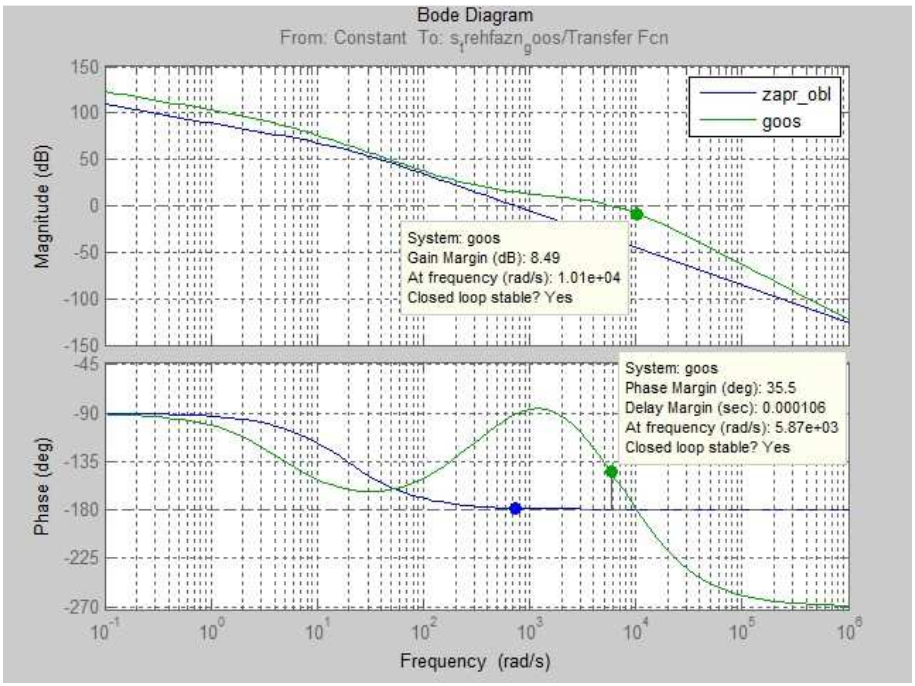
Листинг m-файла, осуществляющего преобразование передаточных функций и вычисление коэффициентов [1]:

```
T=0.00001; % Такт квантования
 % Фильтр обратной связи
Wo_pi=tf([0.0000016,0],[0.0042,1]); % Д составляющая регулятора обратной связи
Wz_o=c2d(Wo_pi,T);
ssz_o=ss(Wz_o);
 % Фильтр прямой связи
Kp_p=1.3;% П составляющая регулятора прямой связи
Wp_p=tf([0.0015,0],[0.0001,1]); % Д составляющая регулятора прямой связи
Wp_pi=Kp_p+Wp_p; % ПД составляющая регулятора прямой связи
Wz_p=c2d(Wp_pi,T);
```

```
ssz_p=ss(Wz_p);
 global x0o Upro Ao Bo Co Do;
x0o=0;
Upro=0;
Ao=ssz_o.a;
Bo=ssz_o.b;
Co=ssz_o.c;
Do=ssz_o.d;
 global x0p Uprp Ap Bp Cp Dp;
x0p=0;
Uprp=0;
Ap=ssz_p.a;
Bp=ssz_p.b;
Cp=ssz_p.c;
Dp=ssz_p.d;
 global Efi Upr;
Efi=0;
Upr=0;
probnik_goos;
sim('goos').
```



а



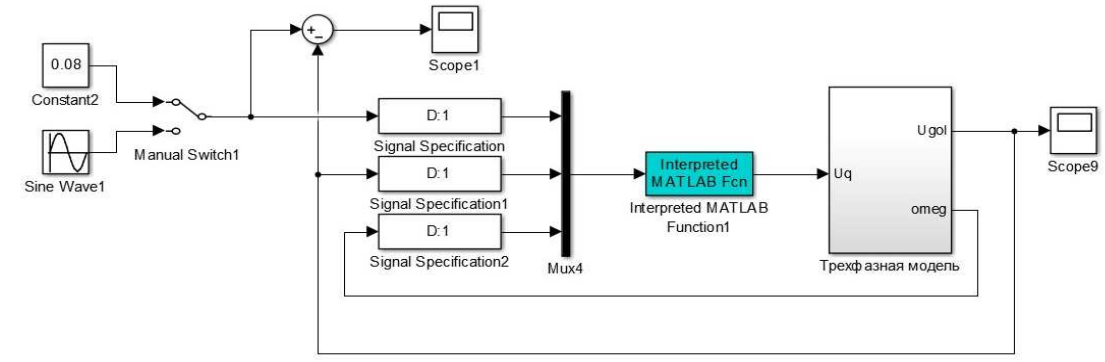
б

Рис. 4. Уточненная ЛАЧХ: а – структурная схема модели в среде Simulink пакета Matlab; б - ЛАФЧХ системы

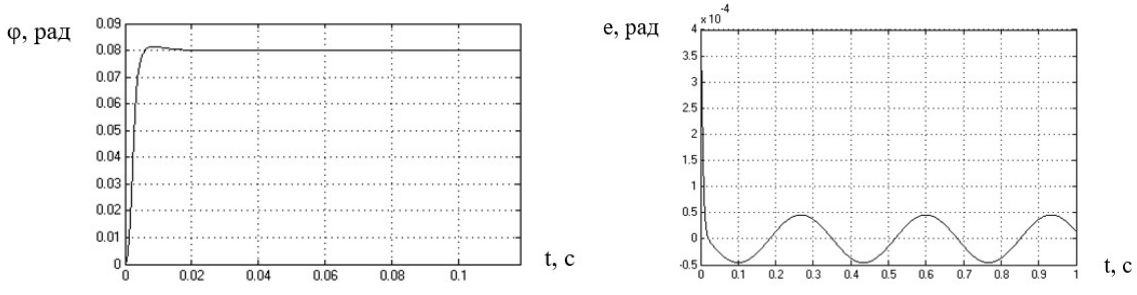
Листинг m-файла, реализующего корректирующие устройства в объединенной форме:

```
function U=goos_filtr(g)
 Efi=g(1)-g(2);
 global x0p Uprp Ap Bp Cp Dp;
   xp=Ap*x0p+Bp*Efi;       Uprp=Cp*x0p+Dp*Efi;
    x0p=xp;   global x0o Upro Ao Bo Co Do;
  xo=Ao*x0o+Bo*g(3);     Upro=Co*x0o+Do*g(3);
    x0o=xo;    global Upr;
 Upr=6696*(Uprp-Upro);     if Upr>24
    U=24     elseif Upr<-24
    U=-24
 else
    U=Upr;
 end;
end
```

Полученная структурная схема в среде Simulink пакета Matlab, а так же переходный процесс системы по углу и определение динамической ошибки в результате реакции на синусоидальный сигнал с амплитудой 0,087 и частотой 18,85 рад/с показаны на рис. 5.



а



б *в*

Рис. 5. Результат реакции на синусоидальный сигнал с амплитудой 0,087 и частотой 18,85 рад/с: а – структурная схема модели в среде Simulink пакета Matlab; б – переходный процесс системы по углу; в – динамическая ошибка

Полученные характеристики переходного процесса: перерегулирование 1,84 %, время регулирования 0,0047 с; динамическая ошибка 0,045736 мрад. Все изученные показатели отвечают заданным требованиям, что подтверждает правильность предложенных методик и разработанных математических моделей.

Разработанные математические модели и предложенные методики синтеза алгоритмов управления высокодинамичными электрическими следящими приводами могут быть полезными при решении задач проектирования высокоточных электрических следящих приводов и мехатронных модулей на их основе.

Список литературы

1. Горячев О.В. Компьютерное управление мехатронными системами: сборник методических указаний к лабораторным работам. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 125 с.

Сафонова София Сергеевна, студент, 19sofinka97@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Горячев Олег Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, olegvgor@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

SYNTHESIS OF THE CORRECTING ALGORITHM FOR HIGHLY DYNAMIC DRIVE OF THE DISTABILIZATION SYSTEM

S.S. Safonova

In this paper, the synthesis of a correcting algorithm for a highly dynamic electric servo drive of the sub-stabilization system is considered: a parallel correcting device is obtained by the method of deep negative feedback; to improve the quality of the transient process, a sequential proportional-differential regulator was introduced; a digital implementation in the Matlab environment of the correcting algorithm combining filters is derived.

Key words: synthesis, correcting algorithm, deep negative feedback method, proportional-differential controller, filter.

Safonova Sofia Sergeevna, student, 19sofinka97@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Goryachev Oleg Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, olegvgor@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 681.51

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО МИКРОПРОЦЕССОРНОГО БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.Г. Ефромеев, Н.Д. Черкасова

В работе рассмотрено устройство универсального микропроцессорного блока управления, способного работать с различными типами исполнительных двигателей. Описана структура встроенного управляющего программного обеспечения блока, учитывающего его универсальность.

Ключевые слова: мехатронный модуль, микропроцессорная система управления, электронный блок управления, встроенное программное обеспечение.

Микропроцессорный блок управления двигателем – основной элемент системы управления мехатронным модулем. Его главными задачами являются: приём информации от входных датчиков, её обработка в соответствии с заданным алгоритмом и формирование управляющего воздействия на исполнительные устройства. Использование электронного регулирования позволяет оптимизировать основные параметры работы двигателя для различных режимов. Электронный блок управления двигателем объединяет аппаратное и программное обеспечение. Аппаратная часть главным образом включает микропроцессор и силовой полупроводниковый усилитель.

В процессе разработки мехатронных модулей часто уже на ранних этапах проектирования встаёт задача экспериментальной отработки различных алгоритмов управления исполнительными механизмами. Но при этом ещё нет окончательно утвержденной структуры блока управления, и, зачастую, не выбран даже тип исполнительного двигателя будущего мехатронного модуля. В связи с этим актуальной является задача разработки универсального электронного блока управления, способного работать с различными типами исполнительных двигателей, наиболее часто используемых в мехатронных системах. В тоже время неотъемлемой частью любой микропроцессорной системы управления является программное обеспечение.

Структура спроектированного блока управления [1] представлена на рис. 1.

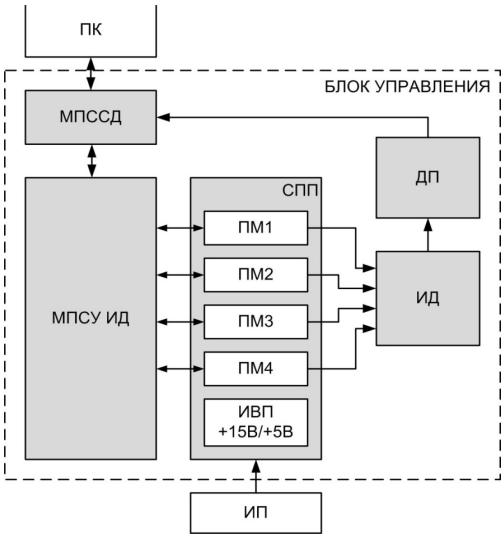


Рис. 1. Структурная схем универсального блока управления: ПК – персональный компьютер; МПССД – микропроцессорная система связи и сбора данных; МПСУ ИД – микропроцессорная система управления исполнительным двигателем; СПП – силовой полупроводниковый преобразователь; ПМ1-4 – полумостовая схема; ИВП – источник вторичного питания; ИП – первичный источник питания; ИД – исполнительный двигатель; ДП – датчик положения и/или скорости

Общий принцип функционирования можно сформулировать следующим образом: информация с датчиков обратной связи и ПК поступает на микропроцессорную систему сбора данных (МПССД) и далее передается на микроконтроллер микропроцессорной системы управления исполнительным двигателем (МПСУ ИД), где в соответствии с алгоритмом управления вырабатывается сигнал, который далее преобразуется с помощью силового полупроводникового преобразователя (СПП). СПП непосредственно формирует управляющие напряжения на обмотках исполнительного элемента. В питании блока участвуют два источника: внутренний, входящий в состав преобразователя (+15 В/+5 В для ряда элементов плат) и внешний (27 В). Связь с ПК осуществляется через интерфейс USB, имеющийся на микроконтроллере платы связи.

Силовой полупроводниковый преобразователь состоит из четырёх регулярных полумостовых блоков ПМ1–4 и вторичного источника питания +15 В/+5 В. Принципиальная электрическая схема одного полумоста из четырех приведена на рис. 2.

В целом СПП представляет собой автономный инвертор напряжения. Логика работы использованных в схеме СПП драйверов IR2184 не позволяет управлять каждым транзистором независимо, а только попарно. Благодаря этому невозможно задействовать запрещённые комбинации открытых ключей, при которых возникает короткое замыкание. Для управления каждой парой ключей используются два сигнала IN и SD. При этом линия SD имеет инверсную логику и управляет включением соответствующей пары

ключей (логическая «1» – ключи закрыты, «0» – открыт ключ, выбранный состоянием линии IN), а линия IN управляет выбором ключа («1» – открыт верхний ключ, «0» – открыт нижний ключ).

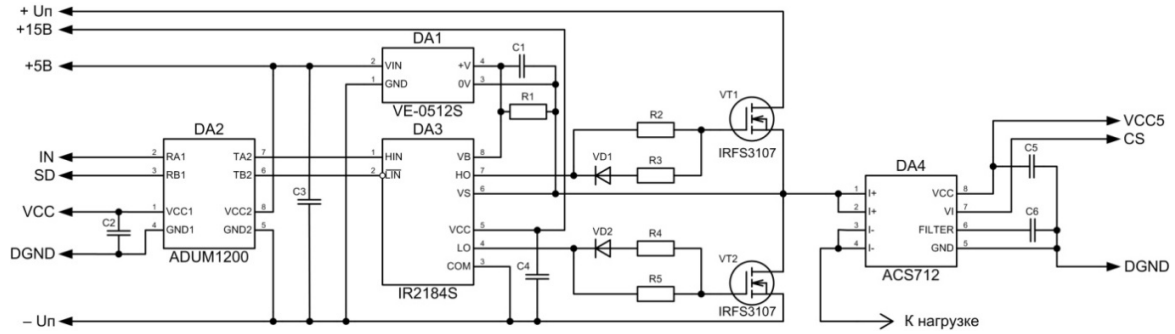


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема полумоста СПП

Такая структура СПП обеспечивает универсальность разработанного блока управления, т.к. даёт возможность управления максимально широким диапазоном разновидностей электрических исполнительных двигателей: двигателем постоянного тока (ДПТ) с возбуждением от постоянных магнитов (можно подключить два одновременно), ДПТ с независимым возбуждением, ДПТ с последовательным возбуждением (сериесный двигатель) с одной и двумя обмотками возбуждения, двухфазным и трехфазным синхронным двигателем, шаговыми двигателями, трёхфазными асинхронными двигателями и др. Примеры подключения некоторых типов двигателей представлены на рис. 3. При этом отпадает необходимость для каждого случая разрабатывать новую систему управления, что упрощает и ускоряет процесс исследования мехатронных модулей и апробации создаваемых алгоритмов управления.

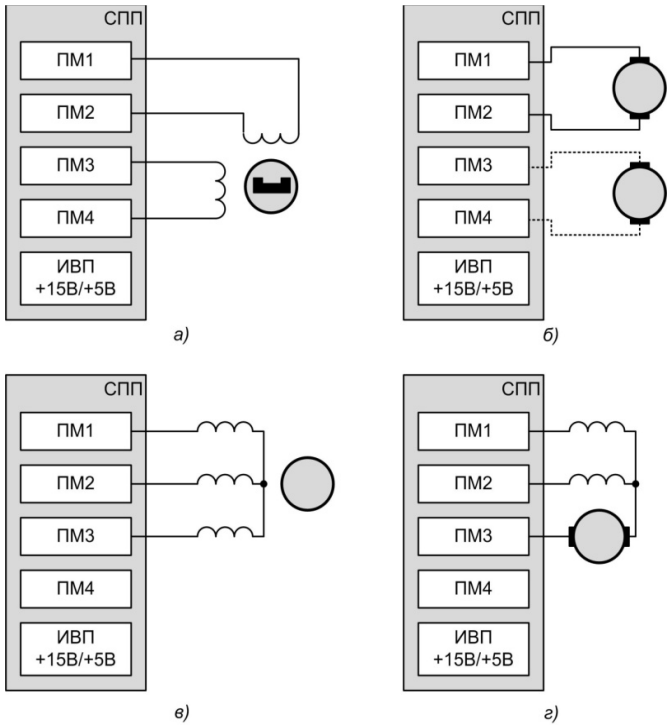


Рис. 3. Подключение разных типов двигателей к универсальному блоку: а – двухфазный синхронный двигатель или двухфазный шаговый двигатель; б – двигатель постоянного тока (возможно подключение двух одновременно); в – трёхфазный двигатель; г – двигатель с последовательным возбуждением и двумя обмотками возбуждения

Для реализации МПСУ ИД и МПССД универсального блока управления выбран микроконтроллер серии STM32F415x фирмы STMicroelectronics с ядром ARM Cortex-M4F, который ориентирован на использование в качестве вычислительного устройства цифрового электропривода с различными современными типами исполнительных двигателей и имеет специализированные периферийные устройства (быстродействующее АЦП, интерфейс подключения квадратурного энкодера (в частности фото-импульсного датчика углового положения), интерфейс датчиков Холла, 4-х канальные ШИМ-таймеры с «мертвым временем» и возможностью совместной работы), а также оснащён всеми необходимыми интерфейсами связи (SPI, UART, USB). Программное обеспечение для МПСУ написано на языках высокого уровня Си с использованием библиотеки для поддержки процессорного ядра (CMSIS).

Структура разработанного ПО универсального блока представлена на рис. 4. Оно состоит из нескольких уровней абстракции, что способствует универсальности написанного программного кода, а также в целом повышает его качество.

Как показано на рис. 4, встроенное ПО блока можно разделить на следующие уровни:

1 уровень. Стандартные программные библиотеки настройки и работы с функциями ядра ARM Cortex-M4F. В данном случае состоит из двух библиотек:

system_stm32 – процедуры начальной настройки вычислительного ядра и инициализации схемы тактирования;

stm32f41x_it – процедуры обработки системных прерываний.



Рис. 4. Структура программного обеспечения универсального блока

2 уровень. Низкоуровневые библиотеки непосредственного взаимодействия с периферией микроконтроллера (портами, таймерами, интерфейсами, АЦП и т.д.). Это наиболее обширная группа программных модулей, которые также остаются неизменными в процессе эксплуатации блока, включает в себя:

gpio_lib – функции инициализации портов ввода-вывода и управления портами;

timer_lib – низкоуровневые функции инициализации и управления таймерами;

adc_lib – библиотека инициализации и управления аналого-цифровым преобразователем, встроенным в микроконтроллер;

comm_lib – процедуры инициализации и обмена данными по последовательным интерфейсам SPI и UART;

3 уровень. Библиотеки, содержащие вспомогательные функции, обеспечивающие высокоуровневое взаимодействие с различными датчиками, первичной обработки данных от датчиков и АЦП, а также обмен информацией с внешними блоками. Включает, в частности библиотеку **encoder_lib** для работы с фото-импульсными датчиками угловых перемещений, используемыми в качестве датчиков положения ротора для некоторых типов исполнительных двигателей. Функции этих библиотек уже не работают напрямую с периферией, а используют более низкоуровневые модули.

4 уровень. Данный уровень включает в себя программную библиотеку **motor_lib** высокоуровневых функций настройки периферии для работы с выбранным типом ИД, обработки данных с датчиков (ФИД, датчики тока), управления формированием напряжений на обмотках ИД.

Т.к. ПО должно поддерживать работу с различными типами ИД было принято решение реализовать функцию независимого управления состоянием всех четырёх полумостов (ПМ1-4), а затем уже под каждый тип двигателя формировать требуемый набор состояний и переключаться между ними в режиме конечного автомата, реализуя таким образом требуемую схему коммутации обмоток. Описывать каждое такое состояние удобнее всего с помощью структуры:

```
typedef struct
{       uint16_t        PM1H;
        uint16_t        PM1L;
        uint16_t        PM2H;
        uint16_t        PM2L;
        uint16_t        PM3H;
        uint16_t        PM3L;
        uint16_t        PM4H;
        uint16_t        PM4L;
}SSPstate_t;
```

Соответственно, для каждого из восьми силовых ключей в этой структуре задаётся нормированная скважность сигнала на открытие, формируемого виде ШИМ. Таким образом число 0x0000 на протяжении всего периода ШИМ, а число 0xFFFF – полностью открытый. Здесь следует отметить, что схемотехника СПП такова, что некоторые запрещённые комбинации состояний ключей (например, одновременное открытие верхнего и нижнего ключа в одном ПМ) реализовать невозможно. Поскольку каждый ПМ имеет две линии управления IN и SD, функционирующие в соответствии с логикой работы драйверов IR2184, то для формирования необходимого состояния СПП используется специальная функция модуля **motor_lib**.

5 уровень. К данной группе относится программный код самого высокого уровня – пользовательского, т.е. именно здесь исследователь будет размещать свой код при эксплуатации универсального блока, т.е. в процессе отладки различных разрабатываемых алгоритмов управления. Также именно в этой части ПО производится высокоуровневая настройка под конкретную задачу блока в целом.

Таким образом, для ранее созданного прототипа универсального управляющего блока разработана структура программного обеспечения, сформированы библиотеки программных модулей различного уровня с учетом требуемой функциональности управляющего блока.

Список литературы

1. Ефромеев А.Г., Черкасова Н.Д. Универсальный электронный блок управления различными типами исполнительных двигателей // XVIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов». Тула: Изд-во ТулГУ, 2020. С. 13 – 18.

Ефромеев Андрей Геннадьевич, канд. техн. наук, доцент, age.sau@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Черкасова Надежда Дмитриевна, студент, nady-cherkasova@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DEVELOPMENT OF EMBEDDED SOFTWARE FOR THE UNIVERSAL ELECTRONIC CONTROL UNIT FOR DIFFERENT MOTORS TYPES

A.G. Efromeev, N.D. Cherkasova

The article considers the developed universal micro-processor control unit capable with various types of motors. The structure of the embedded control software of the unit that provides its versatility is described.

Key words: mechatronics module, microprocessor control system, electronic control unit, embedded software.

Efromeev Andrei Gennadevich, candidate of technical sciences, docent, age.sau@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Cherkasova Nadezhda Dmitrievna, student, nady-cherkasova@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.932

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ КАДРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ЖЕСТОВ РУКИ

Л.В. Шестерняк

Рассмотрены основные методы обработки кадров динамических жестов руки: сглаживание и бинаризация изображений, их поворот и изменение фона. Приведены преимущества использования данных методов при решении задачи распознавания динамических жестов руки.

Ключевые слова: обработка изображений, сглаживание, бинаризация, вычитание фона, динамический жест руки, распознавание динамических жестов.

Динамический жест руки представляет собой совокупность кадров видеопотока, каждый из которых, в свою очередь, определяет некоторый статический жест руки. Каждый статический жест является изображением, из которого необходимо получить полезную информацию – положение руки, скелета, особых точек (суставов) и т.п. Для повышения качества распознавания динамических жестов необходимо подготовить набор данных – обучающую выборку. Для этого проводится обработка каждого кадра динамического жеста. Рассмотрим основные методы обработки изображений, применяемые для решения поставленной задачи.

Сглаживание изображения. Сглаживание изображения – устранение неровностей пиксельных структур таким образом, чтобы места переходов в изображении выглядели наиболее плавными. Сглаживание устраняет шумы и на выходе позволяет получить удобное для дальнейшей работы изображение.

Для выполнения операции сглаживания необходимо применить фильтр к изображению. Наиболее распространенный тип фильтров – линейный, в котором значение выходного пикселя определяется как взвешенная сумма значений входного пикселя [1].

Существует несколько наиболее используемых видов сглаживания изображений [1]: нормализованный фильтр, фильтр Гаусса, медианный фильтр, двусторонний фильтр. Использование каждого из фильтров направлено на подавление шумов, однако двусторонний фильтр оставляет контуры изображений (в некоторой степени) более четкими.

Для распознавания динамических жестов руки необходимо, чтобы контуры руки могли быть определены наиболее точно, недостаточно одной лишь фильтрации шумов на изображении. Таким образом двусторонний фильтр (рис. 1) является наиболее подходящим видом сглаживания для решения поставленной задачи.



Рис. 1. Пример работы двустороннего фильтра

Бинаризация изображения. Для получения изображения, пригодного для бинаризации, необходимо его преобразовать к оттенкам серого (рис. 2) с помощью формулы по стандарту CCIR 601-1 [2].



Рис. 2. Преобразование изображения к оттенкам серого

Бинаризация изображения (рис. 3) – это преобразование изображения в двухцветное черно-белое. Самым известным и простым способом бинаризации изображения является замена любого оттенка серого, ниже определенного порога интенсивности, на белый, а того, который выше – на черный [3].



Рис. 3. Бинаризация изображения

Бинаризация позволяет получить отчетливую фигуру распознаваемого объекта, однако при низком уровне контраста и яркости бинаризация может дать менее четкое изображение объекта. Для того, чтобы результат не зависел от данных показателей, необходимо задать такой пороговый уровень, чтобы количество белых и черных пикселей было в определенном соотношении, например, 50% на 50%.

Получение контуров изображения. Для определения положения объекта на изображении (его границ) необходимо выделить контуры объектов на изображении. Одним из способов определения границ является алгоритм оконтуривания изображения, предложенный Satoshi Suzuki [4] (рис. 4).

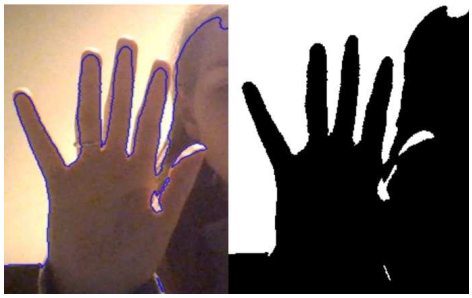


Рис. 4. Получение контуров изображения

Данный алгоритм включает в себя топологический анализ оцифрованных двоичных изображений, представленный двумя алгоритмами поиска границ. Первый определяет отношения окружения между границами двоичного изображения. Второй алгоритм, который является модифицированной версией первого, находит только внешние границы (то есть внешние границы, которые не окружены отверстиями). Эти алгоритмы могут быть эффективно использованы при подсчете компонентов, сжатии и топологическом структурном анализе двоичных изображений.

Скелетизация изображения. Скелетизация (рис. 5) является наиболее подходящим способом представления объектов на изображении, так как позволяет отображать как общую, так и детальную структуру и форму объекта. Скелет является удобным и информативным инструментом для анализа топологических и метрических свойств фигуры.

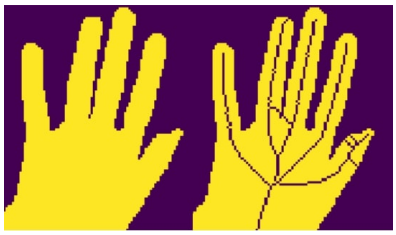


Рис. 5. Скелетизация изображения

Изменение фона изображения. Набор данных для распознавания кадра динамического жеста должен содержать различные варианты того, на каком фоне и в каком положении расположена рука.

Изменение фона бинарного изображения (рис. 6) состоит в следующем: на первом этапе необходимо удалить старый фон путем вычитания изображения фона и изображения руки на нем; следующим этапом является центрирование полученного изображения и нового фона по осям x, y; заключительным этапом является размещение изображения руки на новом фоне.

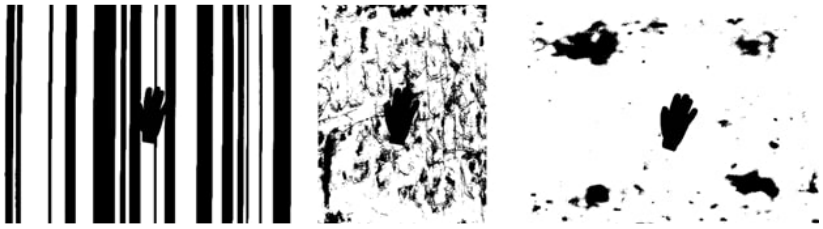


Рис. 6. Пример изменения фона изображения

Поворот изображения. Поворот изображения позволяет изменять положение руки относительно фона. Поворот изображения можно представить следующим образом – вычисляется аффинная матрица 2D вращения [5], после чего применяется аффинное преобразование к изображению.

Выводы. В результате исследования были выделены основные методы обработки кадров видеопотока для решения задачи распознавания динамических жестов руки. Преимуществами данных методов является повышения качества детализации руки на изображении, а также возможность генерации набора данных для распознавания кадра динамического жеста.

Список литературы

1. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений: учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 608 с

2. Oleari C. Standard colorimetry: definitions, algorithms and software. Chichester: John Wiley & Sons, 2016. 512 p.

3. Клетте Р. Компьютерное зрение. Теория и алгоритмы / пер. с англ. под ред. А.А. Слинкин. М.: ДМК Пресс, 2019. 506 с.

4. Suzuki S. et al. Topological structural analysis of digitized binary images by border following // Computer vision, graphics, and image processing. 1985. V. 30. №. 1. P. 32-46.

5. Херн Д., Бейкер М.П. Компьютерная графика и стандарт OpenGL. М.: Вильямс, 2005. 1168 с.

6. Шестерняк Л.В., Ивутин А.Н. Метод и алгоритмы автоматического распознавания динамических жестов руки в системе компьютерного зрения // Интеллект-2019. Интеллектуальные и информационные системы. Труды Всероссийской научно-технической конференции. Тула, Изд-во ТулГУ, 2019. С. 238 – 240.

Шестерняк Любовь Владимировна, бакалавр, fililub123@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

METHODS OF PROCESSING FRAMES OF DYNAMIC HAND GESTURES

L.V. Shesternyak

The main methods of processing frames of dynamic hand gestures are considered: smoothing and binarization of images, their rotation and changing the background. The advantages of using these methods for solving the problem of recognizing dynamic hand gestures are presented.

Key words: image processing, image smoothing, binarization, background subtraction, dynamic hand gesture, dynamic gesture recognition.

Shesternyak Lyubov Vladimirovna, bachelor, fililub123@gmail.com, Russia, Tula, Tula state university

УДК 004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО СИГНАЛА ВО ВНУТРИСОСУДИСТОМ ПРОСТРАНСТВЕ ДЛЯ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ

С.В. Фролов, А.Ю. Потлов, Т.А. Фролова

Рассмотрен алгоритм моделирования интерференционного сигнала потока биологических жидкостей для систем доплеровской оптической когерентной томографии. Численная модель течения со сложной структурой в мягких биологических тканях реализована в виде специализированного программного обеспечения с использованием пакета LabVIEW. Программа моделирования интерференционного сигнала успешно протестирована на гидродинамических фантомах и может быть использована для изучения характеристик и поиска закономерностей, связывающих гемодинамические и оптические величины. Полученные результаты могут найти применение для создания более эффективных методов ангиографии, а также для количественной и качественной оценки скоростей потоков биологических жидкостей в мягких биологических тканях на основе методов оптической когерентной томографии.

Ключевые слова: моделирование методом Монте-Карло, интерференционный сигнал, оптическая когерентная томография, мягкие биологические ткани, внутрисосудистое пространство, плазма крови, эритроциты, профиль скорости потока, гидродинамические фантомы.

Разработка высокоэффективных систем для оптической когерентной томографии (ОКТ) требует не только наличия инженерных навыков, качественных комплектующих и современных сред программирования. Более важным является глубокое понимание биофизических процессов, происходящих в мягких биологических тканях при их зондировании низкокогерентным излучением ближнего инфракрасного диапазона [1]. Существует достаточно большое количество теорий и математических моделей для описания процесса миграции фотонов в исследуемом биообъекте при ОКТ. Одним из наиболее удачных подходов является моделирование методом статистических испытаний Монте-Карло [1]. Конкретные реализации этого метода могут существенно отличаться, но их объединяет идея независимого рассмотрения траекторий большого количества фотонов, с учетом актов взаимодействия (поглощение, рассеяние, отражение, преломление) на пути фотона от источника до детектора, либо до точки когда его дальнейшее рассмотрение перестает быль целесообразным [2]. Точность вычислений методами Монте-Карло возрастает вместе с числом моделируемых фотонов, что при наличии мощных компьютерных систем большой проблемы не представляет [3]. Модели Монте-Карло хорошо описывают процесс миграции фотонов и в толще исследуемого объекта и на его границах и даже позволяют смоделировать процесс получения интерференционных сигналов на детекторах ОКТ-системы с учетом спекл-структуры [4]. Тем не менее многие известные статистические модели не лишены недостатков. Одним из наиболее спорных вопросов является подходы к описанию поведения фотонов во внутрисосудистом пространстве, и соответственно, интерференционного сигнала из этого участка исследуемого биобъекта [5].

С оптической точки зрения кровь целесообразно представлять как высококонцентрированную сильнорассеивающую текучую совокупностью эритроцитов (40…45% от объема) и плазмы (55…60% от объема) с уровнем поглощения и анизотропией рассеяния существенно превышающими средние показатели для мягких биологических тканей. Высокий уровень поглощения главным образом объясняется содержанием в эритроцитах окси- или дезоксигемоглобина, а высокая анизотропия рассеяния во много связана с формой и размерами эритроцитов. В связи с вышесказанным, процентное

содержание крови, уровень гематокрита, насыщение крови кислородом и характеристики ее движения (оттока дезоксигенированной крови и/или притока оксигенированной крови) в существенной мере влияют на оптические характеристики исследуемой ткани [5]. Такое влияние обуславливает необходимость учета гемодинамики при прохождении низкокогерентного инфракрасного излучения ближнего инфракрасного диапазона через мягкую биологическую ткань.

Целью проводимых исследований является разработка эффективных подходов к повышению достоверности описания фотонного транспорта и процесса моделирования интерференционного сигнала ОКТ-систем во временной и частотной области получаемого из области внутрисосудистого пространства.

Материалы и методы. Классический подход к Монте-Карло моделированию ОКТ-изображений включает в себя три характерные стадии:

1) Формирование статичной геометрической модели исследуемого объекта, описывающей принадлежность точек моделируемого объекта к соответствующим слоям или типам тканей, а также оптические характеристики этих структур [6].

2) Моделирование статистических траекторий движения отдельно взятых фотонов или их пакетов [4] от источника излучения до детектора, либо момента «гибели»;

3) Моделирование процесса формирования интерференционного сигнала с учетом количества и характеристик попавших на них фотонов.

Первая стадия выполняется однократно. Вторая и третья стадии выполняются циклически из-за движения источника излучения (ОКТ в частотной и во временной области) и сканирующего объема (ОКТ во временной области).

Целесообразность внесения правок на любой из этих стадии является не очевидной. Современные подходы к формированию геометрических моделей на основе распознавания результатов медицинской визуализации позволяют достоверно описать геометрию исследуемого объекта [3]. Оптические свойства характерные для различных типов тканей достоверно известны из авторитетных источников [2]. Базовые формулы для описания явлений отражения на границах раздела сред, актов поглощения или рассеяния доказаны теоретически и проверены экспериментально [7]. Подходы к имитации интерференционного сигнала также теоретически обоснованы и доказаны высоким соответствием результатов моделирования внутренней структуры неподвижных биообъектов с результатами реальных ОКТ-сканирований [8]. Невысокая достоверность моделирования фотонного транспорта и интерференционного сигнала для области внутрисосудистого пространства связана переменчивостью основных оптических характеристик этой области сканируемого пространства относительно неподвижных окружающих тканей. Необходима дополнительная стадия (между 1-й и 2-й) в которой оптические параметры геометрической модели для области внутрисосудистого пространства варьируются при стабильности параметров геометрической модели для остальных участков исследуемого объекта. Эта стадия также как вторая и третья должна выполняться циклически.

Предлагаемый оригинальный подход к моделированию кровотока в исследуемых биологических тканях отличается тем, что: (I) характеристики участка геометрической модели, соответствующего внутрисосудистому пространству не статичны, а динамически изменяются в процессе моделирования прохождения через них фотонов; (II) динамические изменения включают в себя флуктуации оптических характеристик и геометрии подучастков внутрисосудистого пространства и производятся для всех элементов (пиксели или вокселы) этих подучастков; (III) диапазоны флуктуаций оптических характеристик для пикселей (2D случай) или вокселов (3D случай) внутрисосудистого пространства ограничиваются соответствующими характеристиками плазмы крови и эритроцитов ; (IV) скорость, с которой пиксели (вокселы) разных типов сменяют друг друга различна для отдельных участков внутрисосудистого пространства, причем она выбирается таким образом, чтобы соответствовать желаемой форме профиля скорости потока.

Упрощенная блок-схема предлагаемого подхода к варьированию оптических характеристик геометрической модели представлена на рис. 1.

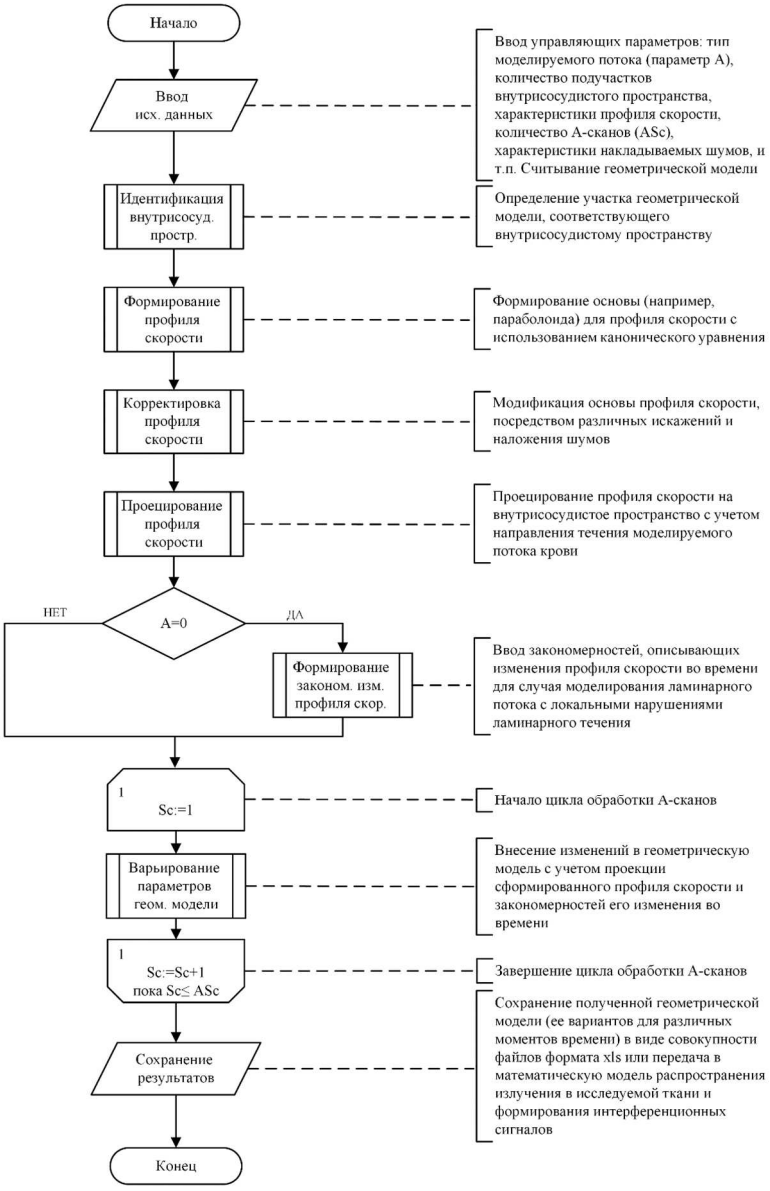


Рис. 1. Упрощенная блок-схема метода моделирования потоков биологических жидкостей со сложной структурой сквозь плоскость ОКТ-сканирования

Первыми действиями при в составе предложенного метода являются ввод управляющих параметров и считывание геометрической модели. В качестве управляющих параметров используются тип моделируемого потока (ламинарный или с локальными нарушениями ламинарного течения), количество подучастков внутрисосудистого пространства, характеристики профиля скорости, количество А-сканов в моделируемом структурном изображении, характеристики накладываемых шумов и т.п. Считывание геометрической модели производится из предварительно подготовленных файлов.

Следующий шаг – это идентификация на геометрической модели области внутрисосудистого пространства. Поскольку при формировании геометрической модели основные структуры уже были идентифицированы и кодированы, вышеуказанное действие сводится к запросу по соответствующему числовому коду.

Основа для профиля скорости моделируемого ламинарного потока или потока с локальным нарушением ламинарного течения биологической жидкости формируется с использованием выбранного пользователем шаблона. Шаблоны представляют собой реализации канонических уравнений геометрии, например уравнения эллиптического параболоида, соответствующего плавно снижающейся от центра сосуда к стенкам

скорости флуктуаций двух типов пикселей или вокселей. Основа профиля скорости модифицируется таким образом, чтобы более достоверно соответствовать профилям реальным потоков. Для этого используется ручное внесение различных искажений («растягивание» профиля его «сдавливание» и т.п.) и наложение шумов. Проецирование сформированного профиля на область внутрисосудистого пространства осуществляется для того чтобы достичь их соответствия по размерам. При этом проекция профиля принимает масштабы внутрисосудистого пространства, но формируется с наклоном в соответствии с направлением течения моделируемого потока крови. С геометрической точки зрения происходит формирование массива данных, размерность которого достаточна для описания внутрисосудистого пространства, а каждый элемент соответствует скорости флуктуации оптических параметров в этой точке.

По необходимости формируется набор закономерностей характеризующих изменения в характеристиках профиля потока во времени. Этот набор представляет собой совокупность уравнений [3]. Одно уравнение характеризует один подучасток внутрисосудистого пространства. Например, скорость флуктуации двух типов пикселей или вокселов для некоторого подучастка внутрисосудистого пространства весь моделируемый временной диапазон меняется линейно с заданном интервале, а скорость аналогичных флуктуаций для другого подучастка меняется экспоненциально, причем при достижении заданного уровня становится константой и т.п.

Варьирование параметров геометрической модели исследуемого объекта производится после того как проекция профиля скорости на внутрисосудистое пространство и закономерности ее изменения (если они нужны) сформированы. Характеристики участков геометрической модели модифицируются в цикле обработки отдельных столбов (А-сканы), соответствующих внутрисосудистому пространству. Величины скорости флуктуаций типов пикселей или вокселей есть в проекции профиля скорости. Величины скорости изменения этих скоростей есть в закономерностях. Сохранение всех вариантов этой модели для различных моментов времени в виде совокупности файлов формата xls производится после завершения цикла внесения изменений в геометрическую модель моделируемого биообъекта. Также возможен вариант прямой передачи этих данных в математическую модель распространения излучения в исследуемой ткани и формирования интерференционных сигналов [8].

Результаты и обсуждение. Предлагаемый метод циклического модифицирования параметров геометрической модели в процессе численного моделирования интерференционного ОКТ-сигнала является лаконичным дополнением к известным вариантам метода Монте-Карло [2,8,9]. Теоретические аспекты совместимости моделей и причины эффективности предложенного решения описаны ниже:

Первый этап моделирования ОКТ-изображений выполняется однократно и в некотором смысле слова обособленно от остальных, его результат – геометрическая модель исследуемого биообъекта или пространственные распределениями оптических параметров в исследуемом биообъекте. Обособленность первого этапа от остальных объясняется наличием в его составе ручной операции идентификации структур исследуемого объекта, требующей от пользователя определенных медицинских знаний [6]. Желательной является экспертная (врач, биолог) проверка результатов первого этапа. Поэтому целесообразны режимы как автоматической передачи данных о геометрии и оптических свойствах исследуемого объекта в единую программу, так и загрузки вышеуказанных данных в виде файлов данных [10]. Второй-четвертый этапы выполняются совместно. Передача данных между моделями при этом производится без непосредственного участия пользователя. Участок геометрической модели, соответствующий просвету кровеносного сосуда постоянно модифицируется (второй этап) таким образом, чтобы имитировать флуктуации эритроцитов или их агрегаций в плазме крови. Причем скорость этих флуктуации в различных участках сосудистого русла выбирается таким образом, чтобы соответствовать желаемой форме профиля скорости потока. Если поток ламинарный (Пуазейлевский или параболический профиль), то скорость флуктуаций двух типов

пикселей (вокселей) снижается от центра сосуда к стенкам, если имеются локальные нарушения ламинарного течения или турбулентность, то скорости флуктуаций формируют пробкообразные профили различной геометрии. Управляемое движение источника фотонов на третьем этапе обеспечивает расчет траекторий движения фотонов, необходимых для построения (четвертый этап) отдельных А-сканов структурного изображения [6]. А-сканы формируются с относительно постоянной спекл-структурой и минимальными фазовыми сдвигами для неподвижных частей исследуемого объекта со стационарной геометрической моделью. Флуктуации оптических свойств, и частично геометрии внутрисосудистого пространства в процессе движения фотонов сквозь участок исследуемого объекта, соответствующий кровеносному сосуду приводят к особенностям в траекториях движения фотонов отдельных А-сканов. Эти особенности, в частности, выражаются в иной геометрии спекл-шумов во внутрисосудистом пространстве и накоплении фазового сдвига между А-сканами [4]. Эти особенности в целом советует поведению реального интерференционного сигнала из области внутрисосудистого пространства в физических экспериментах с ОКТ-системами [10,11]. А-сканы объединяются в В-сканы, т.е. структурные ОКТ-изображения и визуализируются пользователю. Работа программного комплекса по моделированию ОКТ-изображений на этом завершается.

Геометрическая модели сетчатки глаза человека пригодная для использования при моделировании по вышеописанному способу показана на рис. 2. Оттенки цветка кодируют характерные биологические структуры в составе моделируемого объекта. Коды цветов поставлены в соответствие со справочными данными по типичным оптическим свойствам и характерной толщине для каждой моделируемой структуры и приведены в таблице.

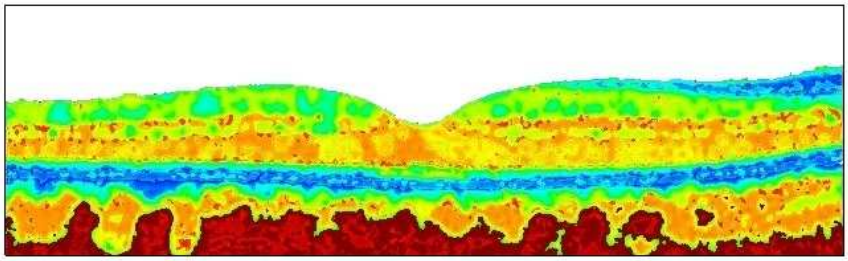


Рис. 2. Геометрическая модель сетчатки глаза, как совокупности слоистых структур со сложной геометрией границ

Анатомические структуры глаза человека, зондируемые при проведении ОКТ-диагностики, и их усредненные характеристики в норме

Название структуры	Коэффициент поглощения, μ_a [мм$^{-1}$]	Коэффициент рассеяния, μ_s' [мм$^{-1}$]	Толщина, d [мм]
Роговица	0.027	0.09	2.3
Внутриглазная жидкость			
Хрусталик			
Стекловидное ело			
Слой нервных волокон	0.025	0.073	0.04
Слой ганглиозных клеток	0.031	0.078	0.055
Внутренний сетчатый слой	0.028	0.084	0.048
Внутренний зернистый слой	0.031	0.21	0.046
Наружный сетчатый слой	0.034	0.28	0.053
Фоторецепторный слой	0.037	0.24	0.094
Слой пигментного эпителия	0.08	0.9	0.051

Пример использования метода моделирования потоков биологических жидкостей со сложной структурой сквозь плоскость ОКТ-сканирования показан на рис. 3. Начальная и конечная форма профиля для потока крови в сосуде сетчатки глаза

представлены на рис. 3, а. и б, соответственно. Оба профиля сформированы с использованием канонического уравнения параболоида вращения. Начальная форма профиля свободна от шумов. Однако эти шумы появляются и нарастают по мере моделирования. На рис. 3, в показана закономерность, связывающая уровень шумов и моделируемый момент времени. В данном примере зависимость задана квадратным уравнением. Профиль ламинарного потока (рис. 3, а) плавно трансформируется в профиль потока с локальными нарушениями ламинарного течения (рис. 3, б).

Вышеописанный пример показывает, что предлагаемый подход позволяет моделировать не только изменения в А-сканах в составе одного структурного ОКТ-изображения. Но, также имеется возможность моделировать необходимые для нужно ангиографии последовательности структурных изображений исследуемой ткани пронизанной кровеносными сосудами [11].

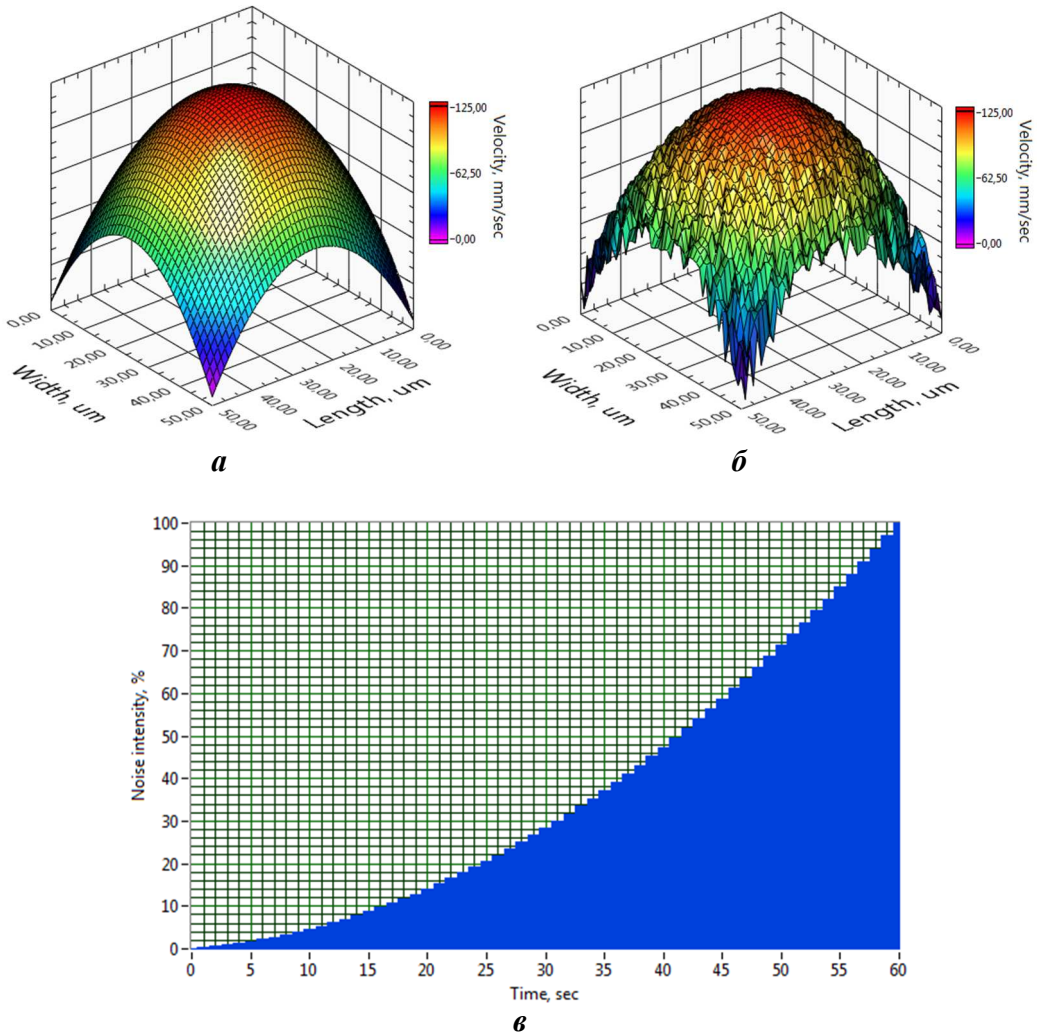


Рис. 3. Начальная (а) и конечная (б) форма профиля формируемого потока, а также закономерность перехода первой формы во вторую (в)

Следует отметить, что предложенные усовершенствования к численной модели процесса формирования интерференционных сигналов в ОКТ не оказывают существенного влияния на продолжительность вычислений. Наиболее ресурсоемкая операция – это расчет индивидуальных траекторий для миллионов фотонов с учетом множества актов взаимодействия [2, 5, 8]. Формирование профилей по каноническим уравнениям, внесение в них шумов, проецирование профилей с учетом простейших закономерностей удлиняют процесс вычислений всего на несколько десятых долей секунды.

Выводы. Предлагаемый метод модифицирования геометрической модели исследуемого объекта для моделирования кровотока в нем был практически реализован в виде программного продукта в среде LabVIEW. Разработанный программный продукт был интегрирован с модулем формирования геометрических моделей на основе изогелии готовых результатов медицинской визуализации и математической моделью для статистического моделирования миграции фотонов в мягких биологических тканях с последующим формированием структурного ОКТ-изображения [3].

Ключевые особенности предложенного метода заключаются в следующем: характеристики участка геометрической модели, соответствующего внутрисосудистому пространству не статичны, а динамически изменяются в процессе моделирования прохождения через них фотонов; динамические изменения включают в себя флуктуации оптических характеристик и геометрии подучастков внутрисосудистого пространства и производятся для всех элементов этих подучастков; диапазоны флуктуаций оптических характеристик для пикселей (2D случай) или вокселов (3D случай) внутрисосудистого пространства ограничиваются соответствующими характеристиками плазмы крови и эритроцитов; скорость, с которой пиксели (вокселы) разных типов сменяют друг друга различна для отдельных участков внутрисосудистого пространства, причем она выбирается таким образом, чтобы соответствовать желаемой форме профиля скорости потока.

Показаны примеры геометрической модели, начального и конечного профилей для потоков в ней, а также функциональной зависимости для трансформации первого профиля во второй.

Предложенный метод модифицирования геометрической модели исследуемого объекта для моделирования кровотока может быть использован для проведения биофизических исследований в составе программных комплексов для моделирования ОКТ-сигнала. Наличие возможности наблюдения изменений в интерференционном сигнале вызванных изменениями в характеристиках потока имеет значительное фундаментальное и прикладное значение [12]. Фундаментальность заключается в наличии потенциала для выявления закономерностей связывающих гемодинамические и оптические величины. Полученные результаты [8, 9] могут быть использованы для создания более эффективных методов ангиографии, а также количественной и качественной оценки скоростей потоков биологических жидкостей (не только кровь, но и лимфа) в мягких биологических тканях на основе методов ОКТ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-15-10327).

Список литературы

1. Kirillin M.Yu., Priezzhev A.V., Myllylä R.A. Role of multiple scattering in formation of OCT skin images // Quantum Electronics, 2008. 38. P. 570–575.

2. Vadakke-Chanat S., Shanmugam P., Sundarabalan B. Monte Carlo simulations of the backscattering measurements for associated uncertainty // Optics Express. 2018. 26(16). P. 21258–21270.

3. Frolov S.V., Potlov A.Yu., Petrov D.A., Proskurin S.G. Monte-Carlo simulation of OCT structural images of human skin using experimental B-scans and voxel based approach to optical properties distribution // Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE. 2017. 10336, 103360Z.

4. Duan L., Makita S., Yamanari M., Lim Y., Yasuno Y. Monte-Carlo-based phase retardation estimator for polarization sensitive optical coherence tomography // Optics Express, 2011. 19(17). P. 16330-16345.

5. Potlov A.Yu., Frolov S.V., Proskurin S.G. Color mapping of one specific velocity of a biological fluid flows with complex geometry using optical coherence tomography // Progress in Biomedical Optics and Imaging – Proceedings of SPIE. 2018. 10716, 107160A.

6. Proskurin S.G., Potlov A.Yu., Frolov S.V. One specific velocity color mapping using optical coherence tomography // Journal of Biomedical Optics. 2015. 20(5). 051034.

7. Proskurin S.G., Potlov A.Yu., Frolov S.V. Doppler mapping of an alternating-sign flow with complex geometry using optical coherence tomography // Quantum Electronics. 2014. 44(1). P. 54–58.

8. Wang R.K., An L. Doppler optical micro-angiography for volumetric imaging of vascular perfusion in vivo // Optics Express. 2009. 17(11). P. 8926-8940.

9. Potlov A.Yu., Frolov S.V., Proskurin S.G. An algorithm for improving the quality of structural images of turbid media in endoscopic optical coherence tomography // Progress in Biomedical Optics and Imaging – Proceedings of SPIE. 2018. 10716, 1071609.

10. Frolov S.V., Potlov A.Yu., Sindeev S.V. Selection of flow-diverter stent models using optical coherence tomography and mathematical modeling of hemodynamics // Biomedical Engineering. 2017. 51(6). P. 381–384.

11. Gorpas D., Koch M., Anastasopoulou M., Klemm U., Ntziachristos V. Phantom and methodology for fluorescence molecular imaging systems benchmarking // Unconventional Optical Imaging – Proceedings of SPIE. 2018. 10677, 106771G.

12. Frolov S.V., Potlov A.Yu., Petrov D.A., Proskurin S.G. Modelling of a structural image of a biological object obtained by means of optical coherent tomography using the Monte Carlo method based on the voxel geometry of a medium // Quantum Electronics, 2017. 47(4). P. 347–354.

Фролов Сергей Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, sergej.frolov@gmail.com, Россия, Тамбов, Тамбовский государственный технический университет,

Потлов Антон Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, zerner@yandex.ru, Россия, Тамбов, Тамбовский государственный технический университет,

Фролова Татьяна Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, frolova2000@gmail.com, Россия, Тамбов, Тамбовский государственный технический университет

SIMULATION OF OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY INTERFERENCE SIGNAL OCCURRING IN THE INTRAVASCULAR SPACE UNDER A LAYER OF SOFT BIOLOGICAL TISSUE

S.V. Frolov, A.Yu. Potlov, T.A. Frolova

An algorithm for modeling the interference signal of biological fluids for Doppler optical coherence tomography is considered. A numerical model of a flow with a complex structure in soft biological tissues is implemented in the form of specialized software using the LabVIEW package. The program for modeling the interference signal has been successfully tested on hydrodynamic phantoms and can be used to study characteristics and search for patterns connecting hemodynamic and optical quantities. The results obtained can find application for the creation of more efficient methods of angiography, as well as for the quantitative and qualitative assessment of the flow rates of biological fluids in soft biological tissues based on optical coherence tomography methods.

Key words: Monte-Carlo simulation, interference signal, optical coherence tomography, soft biological tissue, intravascular space, blood plasma, red blood cells, flow velocity profile, hydrodynamic phantoms.

Frolov Sergej Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, sergej.frolov@gmail.com, Russia, Tambov, Tambov State University,

Potlov Anton Yurievich, candidate of technical sciences, docent, zerner@yandex.ru, Russia, Tambov, Tambov State University,

Frolova Tatiana Anatolievna, candidate of technical sciences, docent, frolova2000@gmail.com, Russia, Tambov, Tambov State University

УДК 621.317

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДСТВ СВЯЗИ СЕТИ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Д.А. Агафонов, О.А. Губская, Д.И. Гурьянов, Г.П. Дорошенко,
С.П. Кривцов, А.В. Милашевский

В статье предложена методика прогнозирования технического состояния средств связи сети связи специального назначения, особенность которой в том, что в отличие от известных методик прогнозирования, в ней учитывается как дрейф значений параметров, так и наличие скачкообразных изменений значений параметров.

Ключевые слова: прогнозирование, средства связи, сеть связи, дрейф.

Анализ применения средств связи в ходе эксплуатации показал важность прогнозирования их технического состояния. Это объясняется тем, что технические изделия в процессе хранения и функционирования испытывают воздействие множества разнообразных внешних и внутренних факторов, это приводит к изменению состояния изделий и, в конечном счете, к отказу не только изделия, но и самой системы, включающей в себя эти изделия как составные части. Цена отказа технических объектов может быть высокой, а отказы средств связи при управлении войсками и оружием оцениваются человеческими жизнями и исходом боевых действий. Поэтому мероприятия, связанные с предотвращением отказов на основе прогнозирования технического состояния, имеют большое значение.

При хранении и эксплуатации средств связи их параметры изменяются во времени. Процесс изменения параметров содержит медленную составляющую – дрейф параметров и скачкообразные отклонения. Дрейф параметров обусловлен старением. Под этим термином понимают совокупность физико-химических процессов коррозии, диффузии вещества, усталостной деформации, механического износа и т. п., приводящих к необратимым изменениям свойств элементов и конструкции устройства. Скачкообразные отклонения параметров вызываются различного рода поломками, обрывами, замыканиями, заклиниваниями и т.п., которые в свою очередь обусловлены конструктивными и технологическими дефектами устройства и эксплуатационными перегрузками. Дрейф параметров может способствовать возникновению скачков параметров, например, накопление усталостных деформаций в конструкции уменьшает пределы ее прочности. Поэтому скачкообразные изменения параметров в определенной мере связаны с дрейфом параметров [1].

На основе статистических данных об отказах элементной базы средств связи установлено, что в среднем 50…60 % возникающих отказов средств связи вызваны дрейфом параметров обусловленных старением элементов, а остальные отказы вызваны скачкообразными изменениями параметров, вызванными различными причинами. Таким образом, при разработке методики прогнозирования технического состояния необходимо учитывать, как отказы, вызванные дрейфом параметров, так и внезапные отказы, вызванные скачкообразными изменениями параметров.

Задача прогнозирования изменения технического состояния средств связи в общем случае заключается в следующем: по результатам контроля технического состояния объекта в предшествующие моменты времени необходимо оценить его работоспособность в последующие периоды функционирования.

Для прогнозирования технического состояния средств связи необходимо построить модель прогнозирования технического состояния либо по совокупности единичных параметров объекта, либо по одному обобщенному параметру. В предлагаемой методике предполагается, что информация об изменении технического состояния рассматриваемых объектов в прошлом имеется на основании контроля технического состояния объектов, который проводится при проведении технических обслуживаний. Поэтому при прогнозировании предпочтение следует отдать алгоритмам экстраполяции.

Экстраполяцией – называют определение будущих значений функции с момента очередного отсчета до момента поступления следующего отсчета, то есть за пределами полученной таблицы данных. Это можно сделать, если известна интерполирующая функция.

Необходимость интерполяции функций в основном связана с двумя причинами:

функция $f(x)$ имеет сложное аналитическое описание, вызывающее определенные трудности при его использовании;

аналитическое описание функции $f(x)$ неизвестно, т.е. $f(x)$ задана таблично. При этом необходимо иметь аналитическое описание, приближенно представляющее $f(x)$ для вычисления значений функции в произвольных точках.

Задача интерполяции заключается в следующем. Пусть на отрезке [a, b] заданы $n+1$ точки $x_i = x_0, x_1, ..., x_n$ называемые узлами интерполяции, и значения функции $f(x)$ в этих точках

$$f(x_0) = y_0,\ f(x_1) = y_1, ...,\ f(x_n) = y_n. \quad (1)$$

Требуется построить функцию $\Phi(x)$, принимающую в узлах интерполяции те же значения, что и $f(x)$, т.е. такую что

$$\Phi(x_0) = y_0, \Phi(x_1) = y_1, ..., \Phi(x_n) = y_n. \quad (2)$$

Геометрически задача интерполяции означает, что нужно найти кривую $y = \Phi(x)$, проходящую через заданную систему точек $M(x_i, y_i), i = \overline{0,n}$ (рис. 1).

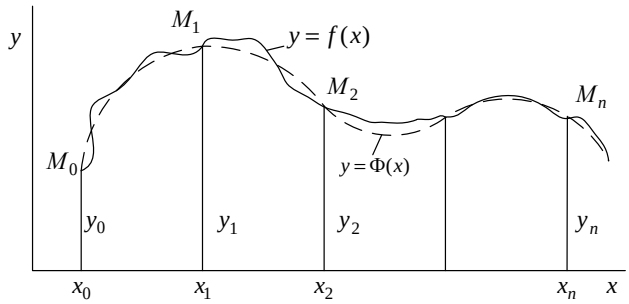


Рис. 1. Геометрическая интерпретация задачи интерполяции

В такой постановке задача может иметь бесконечное множество решений или совсем не иметь решений. Однако эта задача становится однозначной, если вместо произвольной функции искать полином $\varphi(x)$ степени не выше *n* удовлетворяющее условиям (2) т. е. такой, что

$$\varphi(x_0) = y_0, \varphi(x_1) = y_1, ..., \varphi(x_n). \quad (3)$$

Полученный интерполяционный полином

$$\phi(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + ... a_1 x + a_0. \quad (4)$$

используется для вычисления значений функции в точках отличных от узлов интерполяции.

Этот полином имеет $n+1$ коэффициент. Для однозначного определения этих коэффициентов необходимо решить систему $n+1$ уравнений с $n+1$ неизвестными:

$$\begin{cases} y_0 = a_n x_0^n + a_{n-1} x_0^{n-1} + \dots a_1 x_0 + a_0 \\ y_1 = a_n x_1^n + a_{n-1} x_1^{n-1} + \dots a_1 x_1 + a_0 \\ y_2 = a_n x_2^n + a_{n-1} x_2^{n-1} + \dots a_1 x_2 + a_0 \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ y_n = a_n x_n^n + a_{n-1} x_n^{n-1} + \dots a_1 x_n + a_0 \end{cases}. \tag{5}$$

Система уравнений 5 имеет единственное решение так как ее определитель:

$$D = \begin{vmatrix} x_0^n & x_0^{n-1} & \dots & x_0 & 1 \\ x_1^n & x_1^{n-1} & \dots & x_1 & 1 \\ x_2^n & x_2^{n-1} & \dots & x_2 & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_n^n & x_n^{n-1} & \dots & x_n & 1 \end{vmatrix}. \tag{6}$$

называемый определителем Вандермонда отличен от нуля [3]. Отсюда следует, что интерполяционный полином $\varphi(x)$ для функции $f(x)$ существует и единственен.

Для решения задач интерполяции существует ряд специальных видов полинома $\varphi(x)$ (Ньютона, Лагранжа, Эвереста и др.) позволяющих аппроксимировать функцию $f(x)$.

При использовании алгоритмов экстраполяции задача прогнозирования формулируется следующим образом (рисунок 2) [2]. Пусть процесс, характеризующий состояние объекта, представлен в виде многомерной функции $f(\overline{X}, t)$, где $\overline{X}(t) = \{x_0(t), x_1(t), \dots, x_n(t)\}$, которая наблюдается дискретно в период времени $[t_0 - t_n]$ в области T_1 вследствие чего известны значения этой функции $\overline{X}(t_0)$, $\overline{X}(t_1)$, ..., $\overline{X}(t_n)$ соответственно в моменты времени $(t_0, t_1, \dots, t_n) \in T_1$. Необходимо с помощью модели прогнозирования по известным значениям $\overline{X}(t_i)$ определить значения функции $\overline{X}(t_{n+1})$, $\overline{X}(t_{n+2})$, ... , $\overline{X}(t_{n+m})$ в моменты времени $(t_{n+1}, t_{n+2}, \dots, t_{n+m}) \in T_2$ где m – количество точек прогнозирования, T_2 область моментов времени в будущем.

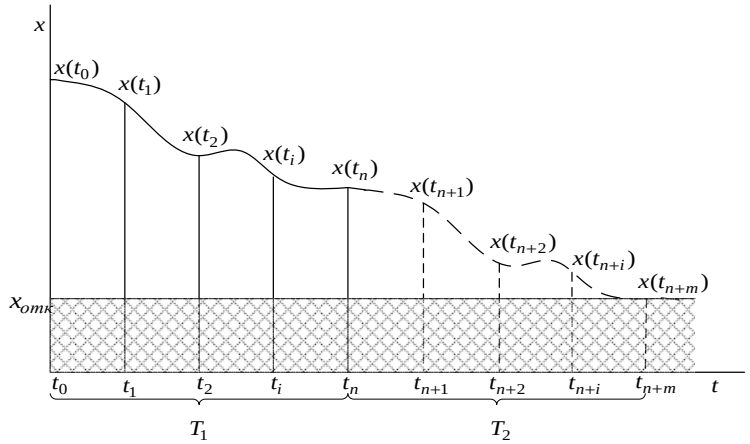


Рис. 2. Геометрическая интерпретация задачи экстраполяции

Однако аппроксимация процесса эксплуатации средств связи полиноминальной зависимостью учитывает только дрейф параметров и не учитывает наличие скачкообразных изменения параметров.

Моделью, описывающей скачки параметров, может служить случайный процесс, в котором появление скачков происходит в случайные моменты времени, а значение параметров после скачка является случайной величиной. Для полного построения этой модели необходимо знать законы распределения вероятности моментов появления скачков и значений параметров. В силу связи скачков параметров с их дрейфом, параметры законов распределения вероятности скачков должны зависеть от вероятностных характеристик дрейфа параметров. Так как эти зависимости достаточно полно и точно отразить в моделях изменения параметров не представляется возможным, воспользуемся упрощенной моделью связи скачков и дрейфа параметров. Закон распределения вероятности моментов времени появления скачков принимаем пуассоновским, а значение параметра после скачка считаем известным.

Для учета вероятности возникновения скачкообразных изменений параметров необходимо выполнить нормирование параметров. Под нормированием в дальнейшем будем понимать приведение значений контролируемых параметров к величине ε_i, ограниченной интервалом от 0 до 1.

Приведению к единой безразмерной (нормированной) системе исчисления посвящено много трудов, однако в случае контроля параметров техники связи целесообразно применить следующий алгоритм нормирования параметров, по причине того, что он позволяет учитывать несимметричность полей допуска:

$$\begin{cases} x_i > x_{nom} \Rightarrow \varepsilon_i = \dfrac{\tilde{b}_i - x_i}{\tilde{b}_i - x_{nom}}; \\ x_i \le x_{nom} \Rightarrow \varepsilon_i = \dfrac{x_i - \tilde{a}_i}{x_{nom} - \tilde{a}_i}, \end{cases} \tag{7}$$

где $\tilde{a}_i, \tilde{b}_i$ –границы поля допуска *i*-го параметра; x_{nom} – номинальное значение *i*-го параметра.

Таким образом, область работоспособности объекта будет ограничена значением $0 < \varepsilon_i < 1$, причем значение $\varepsilon_i = 1$ соответствует наилучшему техническому состоянию техники связи, которое соответствует номинальным значениям контролируемых параметров, значение $\varepsilon_i = 0$ соответствует наихудшему техническому состоянию техники связи, которое наблюдается при приближении значений контролируемых параметров к своим граничным значениям.

Тогда значение параметра запишем в виде:

$$U(t) = e^{-\lambda t}\phi(t) + (1 - e^{-\lambda t})\xi \tag{8}$$

где $e^{-\lambda t}$ – вероятность того, что за время t скачка не произойдет, $\varphi(t)$ - экстраполяционный полином, $(1 - e^{-\lambda t})$ вероятность хотя бы одного скачка за время t, ξ – значение параметра после скачка.

Таким образом, для нахождения значения параметра в момент времени t необходимо построить полином $\varphi(t)$.

В качестве полинома для экстраполяции целесообразно использовать полином Лагранжа, который имеет вид:

$$\phi(t) = \sum_{i=0}^{n} f(t_i) \frac{(t - t_0)(t - t_1)(t - t_{i-1})(t - t_{i+1})...(t - t_n)}{(t_i - t_0)(t_i - t_1)(t_i - t_{i-1})(t_i - t_{i+1})...(t_i - t_n)}, \tag{9}$$

где $f(t_i)$ – значение прогнозируемого параметра в точке t_i.

Таким образом, методика прогнозирования технического состояния средств связи включает следующие этапы:

сбор, анализ и предварительная обработка исходных данных;

аппроксимация функции полиномом Лагранжа;

расчет прогнозных значений показателей работоспособности средств связи;

оценка достоверности прогноза.

Исходными данными для прогнозирования технического состояния средств являются данные об изменении технического состояния образца, полученные в результате контроля технического состояния средства связи за предшествующий период эксплуатации.

Построив по выражению 9 полином в форме Лагранжа, по формуле 8 найдем значение параметра в момент времени $t_{\text{прог}}$, причем вторым слагаемым в данном выражении можно пренебречь, так как значения параметров контроля являются нормированной величиной и в случае нахождения их вне поля допуска они принимают значение равное нулю.

Статистические данные изменения технического состояния средств связи при эксплуатации свидетельствуют [4], что это изменение может быть аппроксимировано экспоненциальным законом распределения прогнозирующего параметра во времени. Поэтому проверку достоверности прогнозирования проведём на экспоненциальном законе распределения случайной величины во времени. Для этого, рассчитаем значения величины параметра во времени с использованием аппроксимации полиномом Лагранжа и определим величину отклонения истинного значения прогнозируемого параметра от расчетного.

Анализ расчетных данных позволяет сделать вывод: аппроксимация полиномом Лагранжа прогнозируемого параметра дает погрешность не более 0.01 при использовании 9 и более точек параметра в прошлом. Таким образом, для получения требуемой достоверности прогнозирования технического состояния средств связи необходимо иметь не менее 9 значений параметра в предшествующие моменты времени.

Таким образом, предлагаемая методика прогнозирования технического состояния средств связи сети связи специального назначения учитывает, как дрейф значений параметров, так и наличие скачкообразных изменений значений параметров и позволяет с достаточной для практики точностью спрогнозировать изменение технического состояния средств связи для качественного планирования применения по назначению и своевременного проведения технического обслуживания и ремонта.

Список литературы

1. Евланов Л.Г. Контроль динамических систем. М.: Наука, 1979. 432 с.

2. Михайлов А.В. Эксплуатационные допуски и надежность в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Сов. радио, 1970. 216 с.

3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников инженеров. М.: Наука, 1968. 720. с.

4. Зиганшин Р.Г. Основы надежности средств связи и автоматизации. СПб.: ВАС, 2009. 356 с.

Агафонов Дмитрий Алексеевич, адъюнкт, invisibl78@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Губская Оксана Александровна, преподаватель кафедры, oksa-nochka23932393@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного,

Гурьянов Дмитрий Игоревич, преподаватель, guryanovdima1982@gmai.com, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Дорошенко Геннадий Петрович, канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника, genadoroshenko@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Кривцов Станислав Петрович, старший преподаватель, staskriv@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Милашевский Алексей Викторович, адъюнкт, a.milashevskij@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного

METHOD OF FORECASTING THE TECHNICAL CONDITION OF COMMUNICATION FACILITIES COMMUNICATION NETWORKS SPECIAL PURPOSE

D.A. Agafonov, O.A. Gubska, D.I. Guryanov, G.P. Doroshenko, S.P. Krivtsov, A.V. Milashevsky

The article proposes a method for predicting the technical condition of communication facilities of a special-purpose communication network, the peculiarity of which is that, in contrast to the known forecasting methods, it takes into account both the drift of parameter values and the presence of abrupt changes in parameter values.

Key words: forecasting, communication tools, communication network, drift.

Agafonov Dmitry Alekseevich, postgraduate, invisibl78@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marsha la Soviet Union S.M. Budyonny,

Gubskaya Oksana Alexandrovna, teacher, oksanochka23932393@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marsha la Soviet Union S.M. Budyonny,

Guryanov Dmitry Igorevich, teacher, guryanovdima1982@gmai.com, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of communications. Marshal Of The Soviet Union S.M. Budyonny.

Doroshenko Gennady Petrovich, candidate of technical sciences, docent, deputy head of the department, genadoroshenko@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marsha la Soviet Union S.M. Budyonny,

Krivtsov Stanislav Petrovich, senior lecturer, staskriv@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marsha la Soviet Union S.M. Budyonny,

Milashevsky Alexey Viktorovich, postgraduate, a.milashevskij@gmail.com, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of communications named after Marshal Of The Soviet Union S.M. Budyonny

УДК 378.2; 13.00.02

МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПАКЕТА MAPLE 17 ПРИ ИЗУЧЕНИИ ТЕМЫ «ПРОИЗВОДНАЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ» В КУРСЕ ВЫСШЕЙ МАТЕМАТИКИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА

А.А. Рахимов

Настоящая работа посвящена методике использование математической программы MAPLE 17 при изучении производной функции одной переменной и ее применении при решении прикладных задач математики в курсе высшей математики для студентов первого курса технических ВУЗов в условиях кредитной технологии обучения.

Ключевые слова: Maple 17, технический ВУЗ, кредитная технология, высшая математика, самостоятельная работа, производная, применения производной.

Курс высшей математики в техническом вузе является фундаментом математической подготовки будущего специалиста, в ходе которой и осуществляется формирование творческой активности инженера как одного из важнейших критериев для будущей профессиональной деятельности. Очевидно, что формирование творческой активности студентов в обучении не должно носить эпизодический характер, оно должно быть систематическим с первых дней обучения студента в вузе. Вот здесь мы сталкиваемся с рядом проблем. Первая проблема заключается в методике преподавания курса высшей математике в техническом вузе. Преподаватели читают курс, как правило, классически, т.е. не делая упор на то, что перед ними будущие инженеры и для них математика является прикладным аспектом. Вторая проблема связана с «урезанием» часов на изучение курса высшей математики. Причиной уменьшения количества часов на курс высшей математики явилось перераспределение учебной нагрузки в пользу самостоятельной работы студентов, поскольку надлежащая организация и контроль такой работы не были предусмотрены учебными планами.

Основными задачами этого обучения являются:

унификация объёма знаний студентов;

максимальная индивидуализация обучения;

повышение роли самостоятельной работы.

Главное значение имеет повышение роли самостоятельной работы студентов, которая позволяет развивать творческий подход и исследовательские навыки.

Самостоятельная работа как часть процесса самообразования имеет принципиальное методологическое значение. Установка на «добывание» знаний является залогом постоянного улучшения профессионализма в будущем. Самостоятельная познавательная деятельность студента предполагает его умение ориентироваться в новой ситуации, самостоятельно видеть и ставить проблему, находить подходы и пути её решения.

В примерном планировании учебного материала (силлабусом) при четырех занятий в день (в кредитной циклической системе обучения) на изучение темы «производная и ее применение» отводится 12 часов урока в течение 1-го семестра в первом курсе.

Примерное тематическое планирование изучения данной темы выглядит следующим образом (табл. 1).

Таблица 1

Примерное тематическое планирование изучения темы

Количество часов.	Содержание учебного материала.
Производная и её применения	
4 часа	Производные функции первого порядка
4 часа	Производные функции высшего порядка
4 часа	Применение производной

При изучении этой темы, студенты получают не только практические знания, но и умения применять их при решении прикладных задач. На данном этапе задача преподавателя составить систему задач, показывающую применение информационных технологий, при решении прикладных задач математики. Рассмотрим методику решения типовых задач с использованием программы Maple 17.

Современное развитие компьютерных технологий, ориентированных на создание интегрированных пакетов мультимедиа – технологий, привело к появлению компьютерных математических систем четвертого уровня относятся, например Maple и Mathematica [5].

При составлении системы задач необходимо учитывать все методические требования и обеспечить наличие в этой системе типовых задач, к которым относятся задачи на графическое отображение данных, на работу с функциями, нахождение производной [1, 3].

Решение задач происходит в несколько этапов:

1. Математический анализ условия;
2. Компьютерная реализация;
3. Анализ полученных результатов.

Рассмотрим реализацию этих этапов на конкретных примерах.

Задача 1. Найдите производную функции f: $f(x) = \sqrt{1-x^4} + \frac{1}{x^2+3}$ [2, 4]

Решение. Запустим программу Maple 15. В появившемся окне программы укажем команду restart (для обновления экрана) и нажмем клавишу Enter (внимание в конце команды обязательно наличие «;»).

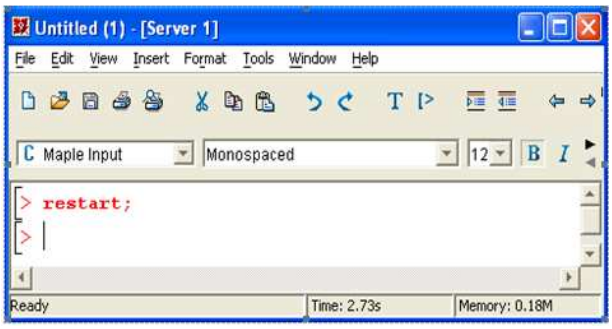


Рис. 1. Запуск программы Maple 17

Введем функцию, от которой требуется найти производную. Значение функции присвоим переменной f. Квадратный корень в Maple вычисляется с помощью функции sqrt, далее введем подкоренное выражение (степень числа записывается как **число ^ степень**). Запишем последнюю часть выражения (деление записывается как **числитель/знаменатель**). Функция будет выглядеть следующим образом: f:=sqrt(1-x^4)+1/(x^2+3).

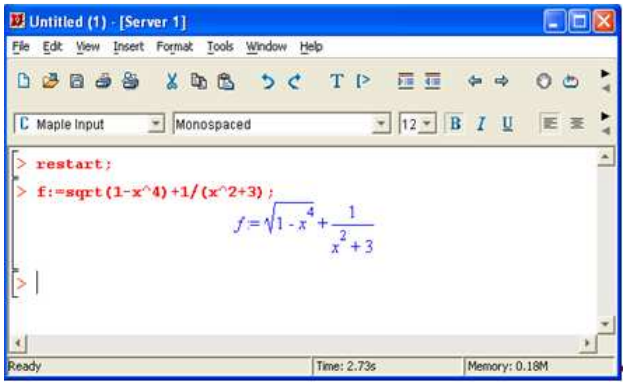


Рис. 2. Ввод функции f(x)

Далее перейдем к нахождению производной от функции. Для этого используем функцию diff, которая позволяет находить производные от заданных функций. В качестве параметра функции diff укажем имя переменной, которой мы присвоили значение исходной функции и переменную, по которой должно быть осуществлено дифференцирование, то есть x. Результат вычисления запишем в переменную f1.

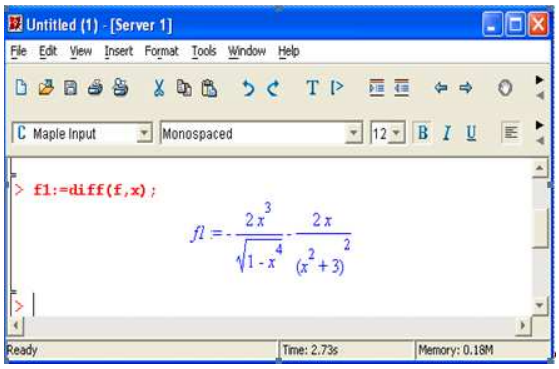


Рис. 3. Производная функции f(x)

Задача 2. Исследовать функцию и построить ее график: $f(x)=\dfrac{6(x-1)}{x^2+3}$.

Решение. Введем функцию, которая будет выглядеть следующим образом: f:=6*(x-1)/(x^2+3).

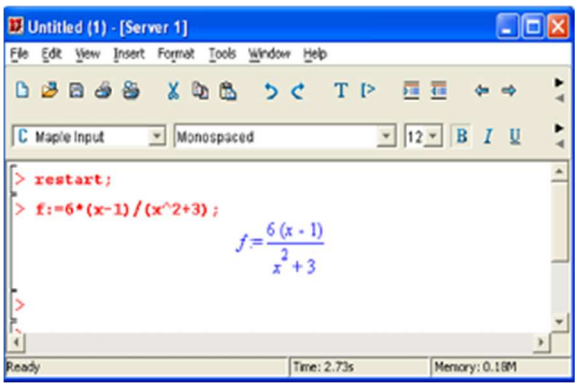


Рис. 4. Ввод функции f(x)

Далее найдем производную функции по x. Результат вычисления запишем в переменную f1.

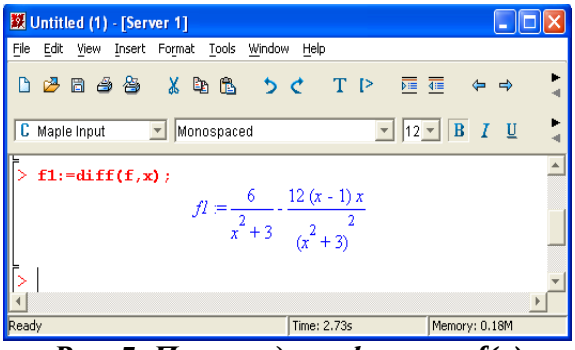


Рис. 5. Производная функции f(x)

Присвоим переменной q значение функции solve (для нахождения критических точек), в качестве параметров функции укажем переменные f1 и x.

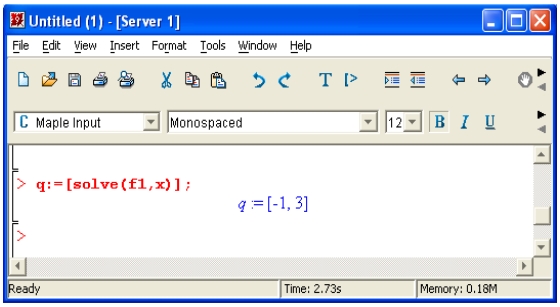


Рис. 6. Критические точки функции f(x)

Найдем точку минимума функции. Для этого переменной A присвоим значение функции min, в качестве параметров которой укажем q[1] и q[2]. Присвоим переменной x значение A, а переменной fmin – f.

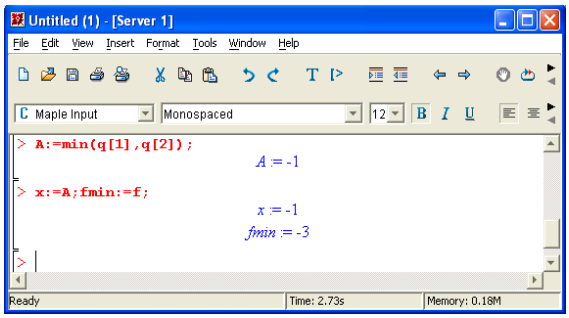


Рис. 7. Точка минимума функции

Найдем точку максимума функции. Для этого переменной A1 присвоим значение функции max, в качестве параметров которой укажем q[1] и q[2]. Присвоим переменной x значение A1, а переменной fmax – f.

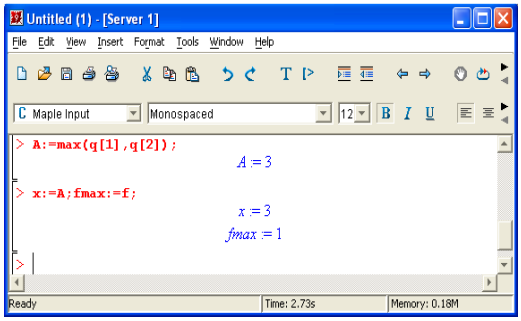


Рис. 8. Точка максимума функции

Найдем нули функции. Для этого переменной x присвоим значение 0, а переменной f0 – значение f.

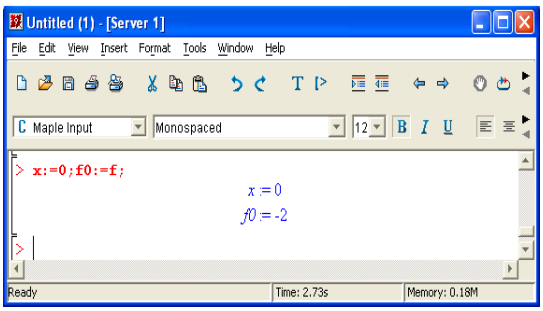


Рис. 9. Нули функции

Используя функцию plot, построим график функции от f2 и x1.

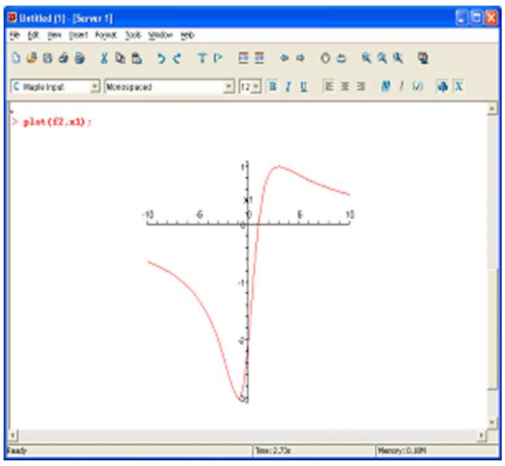


Рис. 10. График функции f(x)

С помощью современных технических средств и интенсивных методов обучения можно заинтересовать студентов, облегчить усвоение материала. Методика использования информационных технологий в целом и обучающие программы в частности предполагает:

1) совершенствование системы управления обучением на различных этапах занятий;

2) усиление мотивации учения;

3) улучшение качества обучения и воспитания;

Занятия с использованием обучающих программ помогают решить следующие дидактические задачи:

1) усвоить базовые знания по предмету, систематизировать усвоенные знания;

2) сформировать навыки самоконтроля;

3) сформировать мотивацию к учению в целом и к математике в частности;

4) оказать учебно-методическую помощь студентам в самостоятельной работе над учебным материалом.

Список литературы

1. Дьяконов В. «Maple 9». Учебный курс. Санкт-Петербург изд. Питер, 2005. 608 с.

2. Васильев А.Н. Maple 8. Самоучитель. М.: Издательский дом «Вильямс». 2003. 352 с.

3. Матросов А.В. Maple 6. Решение задач высшей математики и механики. СПб.: БХВ- Петербург, 2001. 528 с.

4. Глаголев Н.Е., Солнцева Н.И. Курс высшей математики. М.: Наука. 1967. 524 с.

5. Рахимов А.А. Компьютерная система Maple как средство формирования творческой самостоятельности в обучении высшей математике студентов технических вузов в условиях кредитной технологии обучения // Вестник таджикского национального университета (научный журнал. Серия естественных наук). Душанбе-2017. №1/4. С. 57 - 60.

Рахимов Амон Акпарович, канд. пед. наук, старший преподаватель, amon_rahimov@mail.ru, Таджикистан, Худжанде, Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

METHODICAL USE MATHEMATICAL PACKAGE MAPLE 17 WHEN STUDYING THE TOPIC «DERIVATIVE AND ITS APPLICATION» IN THE COURSE OF HIGHER MATHEMATICS FOR STUDENTS OF TECHNICAL UNIVERSITY

A.A. Rakhimov

This paper deals with the use of mathematical software MAPLE 17 in the study of the derivative function of one variable and its application in solving applied problems of mathematics in higher mathematics course for first-year students of technical colleges in a loan program.

Key words: Maple 17, the technical college, credit technology, higher mathematics, independent work, derivative of a derivative.

Rakhimov Amon Akparovich, candidate of pedagogical sciences, senior lecturer, amon_rahimov@mail.ru, Tajikistan, Khujand, Tajik Technical University by academician M.S. Osimi

УДК 004

СПОСОБ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДИАПАЗОНА РАБОЧИХ ВОЛН

Д.В. Фролов, Р.В. Катюха

Создание новых информационных локационных средств перспективных систем предлагается производить с учетом разделения информационных средств по используемым частотным диапазонам в зависимости от решаемых ими задач. При этом способ обоснования выбора диапазонов частот локационных средств предполагает использование разнородных критериев при оптимизационном решении практических задач. Решение оптимизационной задачи производится на основании нахождения парето-оптимальных решений по некоторому частотно зависимому набору критериев.

Ключевые слова: информационные, локационные системы, частотные диапазоны, разнородные критерии, парето-оптимальные решения.

В условиях ограничений по ассигнованиям на разработку и создание новой локационной техники и значительно устаревшего и даже утерянного задела по элементной базе радиолокационных станций выбор диапазона перспективных унифицированных РЛС представляет актуальную задачу. На этапе разработки осуществляется учет различных факторов [1], влияющих на выбор частотного диапазона и даются рекомендации по дальнейшему уточнению используемых длин волн. К числу основных факторов относится:

зависимость стоимости типовых локационных станций от диапазона рабочих волн;

зависимость потенциальных ошибок измерений координат объектов от диапазона рабочих волн;

зависимость помехозащищенности информационных локационных средств от диапазона рабочих волн;

влияние эффективной поверхности рассеяния объекта от длины волн;

электромагнитная совместимость рассматриваемых частотных диапазонов волн типовых локационных средств с другими радиоэлектронными средствами в местах возможной дислокации;

наличие разработанной элементной базы аппаратуры локационных средств различных частотных диапазонов и технологического задела у предполагаемых разработчиков и возможный состав кооперации исполнителей;

наличие разрешенных частотных диапазонов на первичной или вторичной основе по регламенту радиосвязи.

Аппарат математического моделирования, как инструмент получения информации о характеристиках современных сложных систем используется на различных этапах их создания. К числу наиболее часто используемых можно отнести модель ошибок единичных измерений координат и, в том числе, модель ошибок измерений угловых координат. Эта модель, как правило, используется на различных этапах создания локационных информационных средств, начиная с определения технических и тактических требований и заканчивая испытаниями данных средств.

На различных этапах создания локационных средств требования к точности имитации ошибок различны [2]. Так, для определения требований к конструктиву локационных средств, модель должна подробно воспроизводить процессы аппаратурных составляющих ошибок измерений. Моделирование с высокой степенью подробности как правило связано с большими затратами вычислительных ресурсов, но при этом ограничений на быстродействие модели практически нет. На этапе испытаний локационных средств основным требованием к модели ошибок становится качество их воспроизведения при жестких ограничениях вычислительных ресурсов. Это требование обусловлено использованием модели в качестве элемента комплексных моделей, функционирующих в реальном масштабе времени. Здесь завод-изготовитель сталкивается с известным противоречием между точностью и сложностью модели. В данной работе предложен способ разрешения этого противоречия, основанный на двухступенной процедуре проектирования, включающей в себя создание детальной модели и формирование обобщенной модели в результате статистического эксперимента с детальной.

Детальная модель строится таким образом, чтобы наиболее полно и достоверно описать ошибки измерений угловых координат. При этом практически не ограничивается вычислительный ресурс, отводимый для ее реализации. По результатам эксперимента с детальной моделью определяются обобщенные параметры, служащие в дальнейшем для формирования обобщенной модели ошибок. Состав параметров определяется структурой обобщенной модели, в том числе условием ограничения вычислительного ресурса.

Ошибки единичных измерений координат можно представить в виде случайных процессов с известными свойствами. По статистическим свойствам ошибки измерений можно разделить на некоррелированные от замера к замеру $\zeta_1(t)$, ошибки коррелированные во времени $\zeta_2(t)$ и ошибки коррелированные по пространству $\zeta_3(r)$. Таким образом, предполагаемое разделение пространственной и временной составляющей, в общем случае адекватно описывает пространственно-временные характеристики ошибок измерения угловых координат. Тогда, можно описать ошибки угловых измерений как:

$$\varsigma(r,t) = \sum_{l=1}^{3} \varsigma_l(Z_l), \qquad (1)$$

где $Z_l = \begin{vmatrix} t, l = 1,2 \\ r(U_0, V_0, U, V), l = 3 \end{vmatrix}$, U_0,V_0,U,V - целеуказания по угловым координатам и координаты объекта.

По источникам возникновения ошибки могут быть разделены на два класса: собственные и несобственные. Основные источники некоррелированных ошибок - это собственные ошибки, обусловленные внутренними шумами приемника, дискретностью преобразования аналоговой информации в цифровую, нерегулярными неоднородностями в тропосфере. Источником собственных коррелированных во времени ошибок является нестабильность параметров приемо-обрабатывающей аппаратуры. Несобственные обусловлены конструкцией антенной системы, погрешностями монтажа

и юстировки антенного полотна. Ошибки [3], коррелированные по пространству, связаны, как правило, с погрешностями устройства управления положением диаграммы направленности приемной антенны, регулярными неоднородностями тропосферы. Классификация ошибок, обусловленных условием распространения радиоволн, для которых существенным источником ошибок являются неоднородности тропосферы, а характерные продолжительности интервалы работы составляют сотни секунд.

Аналитическая модель ошибок измерений единичных замеров координат представляет собой совокупность функционалов, описывающих систематическую, медленноменяющуюся и быстроменяющуюся составляющие суммарной ошибки единичных замеров координат (ЕЗК). Параметрами модели являются случайные величины, значения которых могут изменяться во времени. Тогда можно записать для момента времени t_i [1]:

$$\sigma i_{\text{бмо}} = \sigma_{\text{бмо}} * \xi_1;$$
$$\sigma_{\text{ну}}(\varphi\psi) = (0.75*\sigma_{\text{ну}} + \sigma_{\text{mну}} *\xi_2)*(1 + a_1\sin^2(\varphi) + a_{2*}\sin^2(\psi)); \quad (2)$$
$$\sigma_{\text{i ну}}(t)= 0.01* \sigma_{\text{ну}} *(\xi_3\cos^2(\omega t_i) + \xi_{4*}\sin2(\omega t_i),$$

где ξ_1, ξ_2, ξ_3, ξ_4 - случайные числа с нормальным законом распределения на интервале (-1, 1); a_1, a_2 - параметры распределения ошибок по полотну; $\sigma_{\text{ну}}$, $\sigma_{\text{mну}}$ – среднее квадратичное значение (СКЗ) неусредняемых ошибок ЕЗК и средний квадрат отклонения математического ожидания неусредняемых ошибок, для угловых координат неусредняемые ошибки $\sigma_{ну}(\phi\varphi) = 0.06 * \frac{\lambda}{D}$; $\sigma_{\text{бмо}}$ - СКО быстроменяющейся ошибки измерения ЕЗК, вычисляется [1]

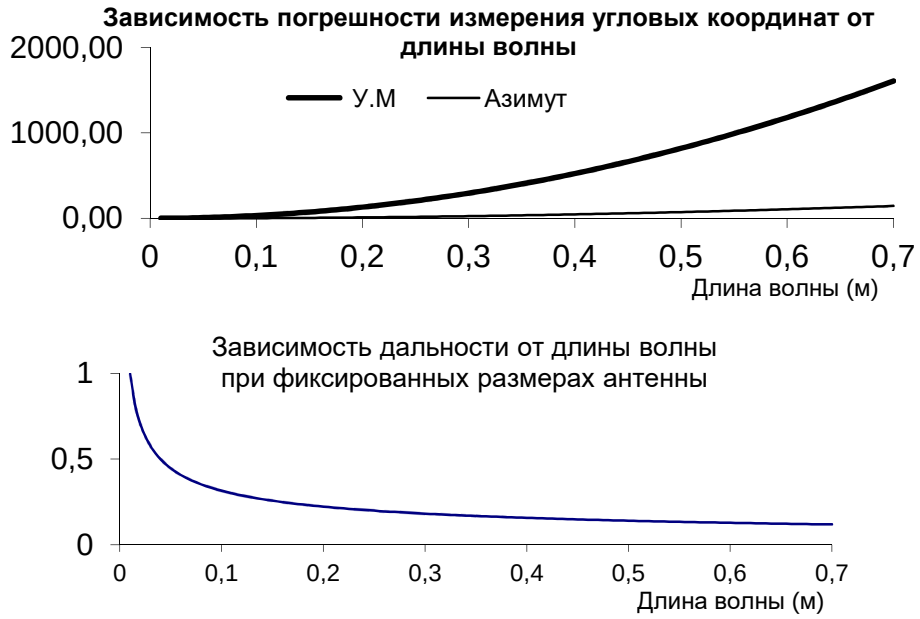
$$\sigma_{\text{бмо}} = \sqrt{\left(\sigma_{шо}^2 + \sigma_a^2\right)}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{шо}}$ - СКЗ шумовой ошибки; $\sigma_{\text{а}}$, - СКЗ аппаратурной БМО.

В свою очередь, СКЗ шумовой БМО определяется выражением [2]:

$$\sigma_{шо} = \frac{\theta_{0.5}}{\mu \cdot q^2}\left[1+\left(\frac{\mu\cdot\theta}{\theta_{0.5}}\right)\right]. \quad (4)$$

Полученные результаты представлены на рисунке.



Зависимости погрешности измерения угловых координат и дальности от длины волны при фиксированных размерах антенны

Заключение. Таким образом, предложенные аналитические модели позволяют получит зависимости характеристик локационных средств при заданных габаритах антенных систем для различных частотных диапазонов и учесть их при выборе рационального частотного диапазона на этапах проектирования сложных систем.

При этом производится оценка зависимости отдельных характеристик локационных средств от диапазона рабочих частот и тактико-технико-экономическое обоснование выбора частотных диапазонов РЛС.

Список литературы

1. Справочник по радиолокации / под ред. М. Сколника: пер. с англ. под общей ред. В.С. Вербы. М.: Техносфера, 2014. 672 с.
2. Испытания РЛС (оценка характеристик) / Леонов А.И., Леонов С.А., Нагулинко Ф.В. и др.: под. ред. А.И. Леонова. М.: Радио и связь, 1990. 208 с.
3. Справочник по радиолокации / под ред. М.И. Скольника. Книга 2. М.: Техносфера, 2014. 680 с.
4. Морелос - Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М.: Техносфера, 2006. 319 с.

Фролов Дмитрий Валерьевич, канд. техн. наук, старший преподаватель, Frdmitrij@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Катюха Роман Васильевич, канд. техн. наук, преподаватель, romankatyuha@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

METHOD FOR ESTIMATING POTENTIAL ERRORS OF OBJECT COORDINATE MEASUREMENTS DEPENDING ON THE OPERATING WAVE RANGE

D.V. Frolov, R.V. Katyukha

It is proposed to create new information locating means of promising systems taking into account the division of information means according to the used frequency ranges, depending on the tasks they solve. At the same time, the method of justifying the choice of frequency ranges of location means involves the use of heterogeneous criteria for the optimization of solving practical problems. The solution to the optimization problem is made on the basis of finding Pareto-optimal solutions for a certain frequency-dependent set of criteria.

Key words: information, location systems, frequency ranges, heterogeneous criteria, Pareto optimal solutions.

Frolov Dmitry Valerievich, candidate of technical sciences, senior lecturer, Frdmitrij@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, A.F. Mozhaisky,

Katyukha Roman Vasilievich, candidate of technical sciences, lecturer, romankatyuha@mail.ru, Russia, St. Petersburg, A.F. Mozhaisky

УДК 621.317

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЬЮ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Д.А. Агафонов, О.А. Губская, Д.И. Гурьянов, С.П. Кривцов, А.В. Милашевский

В статье раскрыты основные принципы построения системы обеспечения безопасности и защиты информации в системе управления сетью связи специального назначения.

Ключевые слова: система управления, сеть связи, безопасность, автоматизированные системы управления, защита информации.

Обобщенная система принципов построения системы обеспечения безопасности и защиты информации в современных системах управления включает ряд аспектов:

непрерывность процесса защиты информации в системах управления;

управляемость процесса защиты информации в системах управления;

комплексность использования средств и методов защиты информации в системах управления;

учет требований защиты при построении самих систем управления и технологии автоматизированной обработки информации в системах управления;

профессиональность решения основных задач защиты информации в системах управления.

Наряду с этим организация системы обеспечения безопасности информации (СОБИ) в системах управления осуществляется на основе своих, присущих только ей фундаментальных принципов. Рассмотрим их подробнее.

Принцип системности означает, что обеспечение безопасности информации, циркулирующей в системах управления, представляет собой регулярный процесс, осуществляемый на всех этапах жизненного цикла автоматизированных систем управления (АСУ) при комплексном использовании всех средств и механизмов защиты управленческих данных для предотвращения или компенсации последствий возможного несанкционированного доступа (НСД).

Принцип специализированности включает три аспекта:

надежные механизмы защиты информации, циркулирующей в системах управления, могут быть разработаны лишь профессиональными специалистами;

осуществление непрерывного процесса обеспечения безопасности информации, циркулирующей в системах управления, возможно лишь на базе средств и механизмов защиты промышленного производства;

обеспечивать эффективное функционирование СОБИ должны специалисты по защите информации, циркулирующей в системах управления.

Принцип неформальности означает, что методология проектирования СОБИ и отдельных механизмов защиты в своей основе является неформальной.

Система обеспечения безопасности информации в рамках АСУ в самом общем виде может быть определена как организованная совокупность всех средств, методов и мероприятий, выделяемых в системе управления для решения в ней выбранных задач защиты информации. Задачи защиты информации в системах управления решаются с целью нейтрализации дестабилизирующего воздействия, нейтрализации причин нарушения целостности информации при обеспечении физической целостности информации или с целью перекрытия каналов несанкционированного получения информации.

Введением понятия СОБИ закрепляется то факт, что все ресурсы, выделяемые для защиты информации, должны объединяться в единую, целостную систему, которая является функционально самостоятельной подсистемой АСУ.

Важнейшим концептуальным требованием к СОБИ является требование адаптируемости, т.е. способности к целенаправленному приспособлению при изменении структуры, технологических схем или условий функционирования АСУ. Важность адаптируемости обусловливается, с одной стороны, тем, что перечисленные факторы, относящиеся к АСУ, вообще говоря, могут существенно изменяться, а с другой – тем, что процессы защиты информации относятся к слабоструктурированным, т. е. содержащим высокий уровень неопределенности. Управление же слабоструктурированными процессами может быть эффективным лишь при условии адаптируемости системы управления.

Помимо общего концептуального требования к СОБИ предъявляется еще целый ряд целевых требований, которые могут быть разделены на:

функциональные;

эргономические;

экономические;

технические;

организационные.

Более того, данные требования могут быть конкретизированы, а соблюдение этих требований в общем случае способствует повышению эффективности защиты. В условиях системно-концептуального подхода к защите необходимо не просто руководствоваться теми или иными общими требованиями – нужна стройная и возможно более полная система конкретных принципов и базирующихся на них детальных требований к СОБИ в АСУ.

Совокупность этих требований в сочетании с принципами построения СОБИ образуют систему, структура и содержание которой показаны на рис. 1.

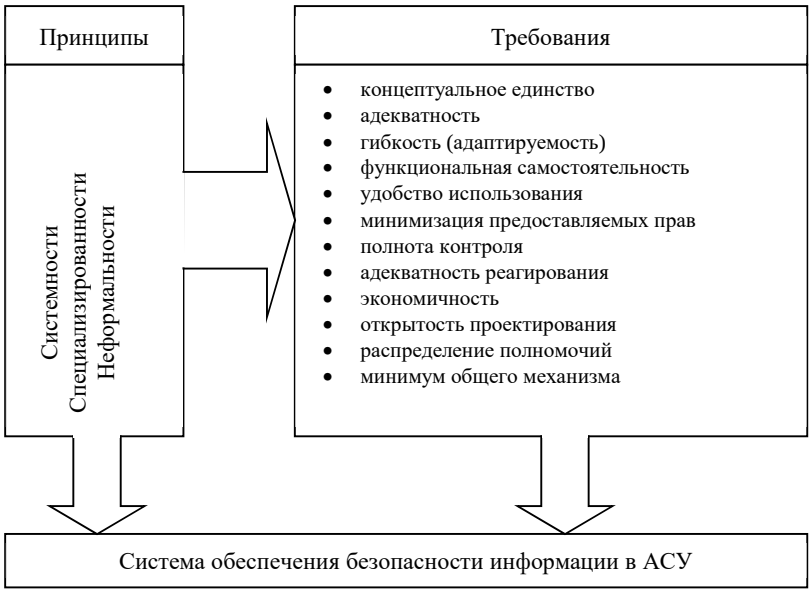


Рис. 1. Принципы организации и требования к СОБИ АСУ

В СОБИ АСУ должны быть предусмотрены «наказания» за нарушения. Характер реагирования может быть различным и включать:

просьбу повторить действие;

задержку в выполнении запросов;

отключение структурного элемента, с которого осуществлено несанкционированное действие;

исключение нарушителя из числа зарегистрированных пользователей;

блокировку терминала при вводе пароля больше разрешенного числа раз;

подачу специального сигнала и некоторых др.

Опираясь именно на эти принципы строится современная СОБИ АСУ, включающая ряд подсистем, которые представлены на рис. 2.

Подсистема доступа объединяет механизмы управления доступом и предназначена для предотвращения несанкционированного использования ресурсов системы управления.

Подсистема обеспечения безопасности данных (передаваемых, принимаемых, обрабатываемых, т. е. данных управления и наблюдения) управления выполняет функции защиты от пассивного (раскрытие содержания, анализ трафика) и активного (изменение, прерывание потока данных; инициация ложного соединения и др.) перехвата данных. В состав подсистемы входят механизмы криптографии, шифрования, цифровой (электронной) подписи, обеспечения целостности, заполнения текста и освидетельствования данных.

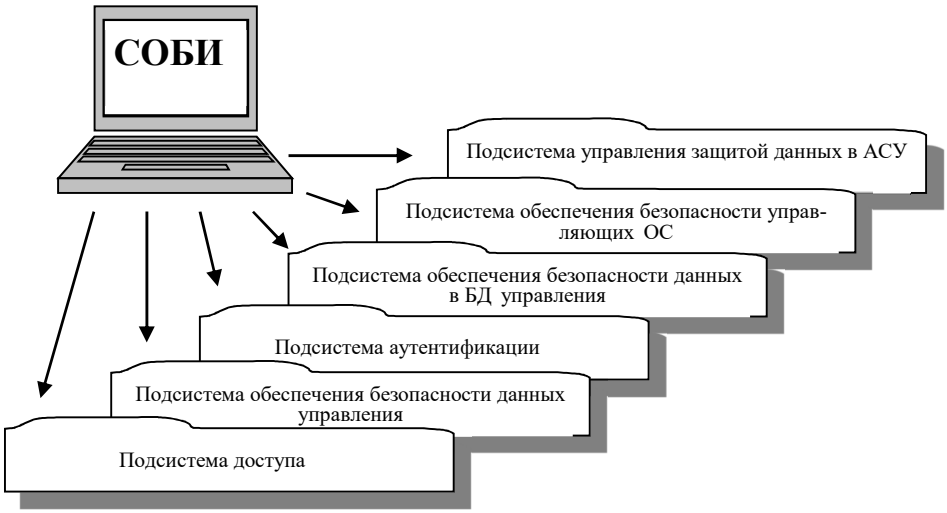


Рис. 2. Основные подсистемы СОБИ АСУ

В тесном взаимодействии с подсистемой обеспечения безопасности данных управления функционирует подсистема аутентификации, которая объединяет различные механизмы аутентификации и обеспечивает подтверждение подлинности пользователей и элементов системы управления.

В подсистему обеспечения безопасности данных в базу данных (БД) управления входят механизмы доступа к управляющим данным и механизмы поддержания целостности управляющим данных в БД АСУ.

Подсистему обеспечения безопасности управляющих ОС образуют механизмы надзора, профилактического контроля, ревизии и управления доступом, функционирующие в составе управляющих ОС, используемых в рамках конкретной системы управления.

Подсистема управления защитой данных в АСУ выполняет функции обнаружения и компенсации последствий нарушения функционирования СОБИ, а также координации функционирования подсистем и элементов системы обеспечения безопасности информации, передаваемой, принимаемой, хранимой и обрабатываемой в контуре управления.

Таким образом, понимание значимости процессов защиты информации в системах управления и возможности применения систем защиты информации играет важную роль в обеспечении безопасности современных автоматизированных систем управления специального назначения.

Список литературы

1. ГОСТ Р 56545-2015. Защита информации. Уязвимости информационных систем. Правила описания уязвимостей. М.: Стандартинформ, 2015. 17 с.

2. ГОСТ Р 56546-2015. Защита информации. Уязвимости информационных систем. Классификация уязвимостей информационных систем. М.: Стандартинформ, 2015. 11 с.

3. ГОСТ Р 53114-2008. Защита информации. Обеспечение информационной безопасности в организации. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ, 2009. 30 с.

4. Коноваленко С.А., Королев И.Д. Выявление уязвимостей информационных систем // Инновации в науке: сб. ст. матер. LXI междунар. науч.-практ. конф. № 9(58). Новосибирск: СибАК, 2016. С. 12-20.

Агафонов Дмитрий Алексеевич, адъюнкт, invisibl78@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного,

Губская Оксана Александровна, преподаватель кафедры, oksanochka23932393@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Гурьянов Дмитрий Игоревич, преподаватель, guryanovdima1982@ gmai.com, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного,

Кривцов Станислав Петрович, старший преподаватель, staskriv@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного,

Милашевский Алексей Викторович, адъюнкт, a.milashevskij@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного

PRINCIPLES OF BUILDING A SECURITY AND INFORMATION PROTECTION SYSTEM IN A COMMUNICATIONS NETWORK MANAGEMENT SYSTEM SPECIAL PURPOSE

D.A. Agafonov, O.A. Gubska, D.I. Guryanov, S.P. Krivtsov, A.V. Milashevsky

The article describes the basic principles of building a security and information protection system in a special purpose communication network management system.

Key words: control system, communication network, security, automated control systems, information protection.

Agafonov Dmitry Alekseevich, postgraduate, invisibl78@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marsha la Soviet Union S.M. Budyonny,

Gubskaya Oksana Alexandrovna, teacher, oksanochka23932393@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marsha la Soviet Union S.M. Budyonny,

Guryanov Dmitry Igorevich, teacher, guryanovdima1982@gmai.com, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of communications. Marshal Of The Soviet Union S.M. Budyonny,

Krivtsov Stanislav Petrovich, senior lecturer, staskriv@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marsha la Soviet Union S.M. Budyonny,

Milashevsky Alexey Viktorovich, postgraduate, a.milashevskij@gmail.com, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of communications named after Marshal Of The Soviet Union S.M. Budyonny

УДК 621.396.67

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПЛАНАРНОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АФФИННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Д.Ю. Шеянов, А.А. Горшков, Н.Ю. Ключко

В статье исследуется возможность использования элементов теории аффинных преобразований пространства для структурного синтеза планарных антенн. Рассматривается задача оптимизации структуры плоской антенной решетки, заключающаяся в выборе такого размещения ее излучающих элементов, которое бы устраняло попадание дифракционных максимумов в область действительных углов при обеспечении полного сканирования в заданном секторе.

Ключевые слова: планарная антенна, характеристика направленности, дифракционный лепесток, аффинное преобразование.

В процессе проектирования и разработки планарных антенн с электронным движением луча, как правило, приходится решать задачи в двух основных направлениях [1]:

1. Выбор компоновки и конфигурации излучающей системы.
2. Разработка системы, осуществляющей обработку сигнала.

Первое направление включает в себя вопросы формирования системой излучателей планарной антенны требуемой диаграммы направленности и выявление законов ее движения, вопросы подавления дифракционных максимумов (боковых лепестков) и т.п.

Второе направление связано с обработкой сигналов возбуждения, поступающих в отдельные излучатели с целью получения в раскрыве антенны управляемого амплитудно-фазового распределения. Система обработки сигналов включает в себя совокупность управляющих и распределительных устройств, оказывающих воздействие на поток электромагнитной энергии в фидерном тракте (фазовращатели, коммутаторы, электронные схемы управления).

Для реализации всего потенциала возможностей планарной антенны и повышения эффективности ее функционирования необходимо осуществить оптимальную конфигурацию ее излучающей системы. С этой целью требуется определить закономерности, связывающие параметры диаграммы направленности при сканировании в заданном секторе с характеристиками излучающей системы. Использование этих закономерностей в дальнейшем позволит ограничить размер выборки возможных схем построения излучающей системы, удовлетворяющих поставленным требованиям. И уже после этого, в рамках решения задач второго направления, целесообразно выработать требования к управляющим и распределительным устройствам планарной антенны.

С целью решения задач первого направления исследуем свойства излучающей системы планарной антенны с учетом исключения возможности попадания дифракционных максимумов в область действительных углов при обеспечении полного сканирования в заданном секторе. Для этого опишем излучающую систему планарной антенны множеством векторов $\{\vec{x}\}$, задающих положение излучателей. Токи по излучающим элементам зададим совокупностью $\{I(\vec{x})\}$. Поле в дальней зоне определим из соотношения вида:

$$F_x(\vec{u}) = \int\limits_{AP} I(\vec{x}) \exp(j2\pi\vec{u}\cdot\vec{x}) d\vec{x}, \quad (1)$$

где $\vec{u}$ – единичный вектор, показывающий направление точки наблюдения.

Будем считать, что все геометрические размеры излучающей системы нормированы к длине волны λ. Для планарной антенны с дискретными излучателями:

$$I(\vec{x}) = \sum_n J(\vec{x}_n), \quad (2)$$

Используя аффинные преобразования, по аналогии с [2], рассмотрим возможность изменения геометрии базовой структуры излучающей системы планарной антенны, с сохранением ее заданных направленных свойств.

Для этого разложим $\vec{x}$ и $\vec{u}$ в ортогональном базисе $[\vec{i}_1, \vec{i}_2, \vec{i}_3]$:

$$\begin{gathered} \vec{x} = x_1\vec{i}_1 + x_2\vec{i}_2 + x_3\vec{i}_3, \text{ т. е. } \vec{x} = E\cdot X; \\ \vec{u} = u_1\vec{i}_1 + u_2\vec{i}_2 + u_3\vec{i}_3 = \sin\theta\cdot\cos\phi\vec{i}_1 + \\ + \sin\theta\cdot\cos\phi\vec{i}_2 + \cos\theta\vec{i}_3, \text{ т. е. } \vec{u} = E\cdot U, \end{gathered} \quad (3)$$

где $X^t = [x_1, x_2, x_3]$; $U^t = [u_1, u_2, u_3]$; t – знак транспонирования.

Далее произведем преобразования X и U с помощью аффинных операторов A и B:

$$Y = A\cdot X, \quad V = B\cdot U \quad (4)$$

Если предположить, что $B^{-1} = A^t$, то скалярное произведение вновь полученных векторов $\vec{y}$ и $\vec{v}$ останется неизменным, т.е. равным $\vec{u}\cdot\vec{x}$. Это легко доказать:

$$\vec{v}\cdot\vec{y} = V^t\cdot Y = (B\cdot U)^t\cdot(A\cdot X) = U^t\cdot X = \vec{u}\cdot\vec{x}, \quad (5)$$

т.е. преобразования A и B определяют подгруппу с инвариантным скалярным произведением [3].

Выражение (1) преобразуем следующим образом:

$$\begin{gathered} F_x(\vec{u}) = \int\limits_{AP} I(\vec{x}) \exp(j2\pi\vec{u}\cdot\vec{x}) d\vec{x} = \\ = \int\limits_{AP} I\left(A^{-1}Y\right) \exp(j2\pi\vec{v}\cdot\vec{y})\cdot|A|^{-1} d\vec{y} = F_y(\vec{v}). \end{gathered} \quad (6)$$

В соответствии с полученным выражением (6) можно сделать вывод, что электромагнитное поле в направлении $\vec{u}$ от излучающей системы планарной антенны $\{\vec{x}\}$ с возбуждением $I(\vec{x})$ будет таким же, что и в направлении $\vec{v}$ от излучающей системы $\{\vec{y}\}$ с возбуждением $|A|^{-1} I(A^{-1}Y)$.

Связь аффинных операторов $A^t\cdot B = E_1$, где E_1 – единичная матрица, осуществляется ортогональностью i-го ряда (столбца) A j-тому ряду (столбцу) B, если $i \neq j$ и при этом обеспечивается равенство скалярного произведения i-тых строк (столбцов) единице. Геометрически этому преобразованию соответствует вращение вокруг $\vec{x}$ и $\vec{u}$.

Если необходимо связать характеристики направленности излучающей системы с множествами векторов $\{\vec{x}\}$ и $\{\vec{y}\}$, то достаточно выбрать преобразование A, а из A определить B ($A^t = B^{-1}$). При этом будет удобно свести геометрию излучающей системы $\{\vec{y}\}$ к структуре $\{\vec{x}\}$ с известной характеристикой направленности. Тогда, заменяя $\vec{x}$ на $A^{-1}Y$, U на $B^{-1}V = A^tV$ можно будет определить характеристику направленности излучающей системы планарной антенны $\{\vec{y}\}$.

Представив аффинор A в виде трех векторов – столбцов $A=[\vec{a}_1,\vec{a}_2,\vec{a}_3]$, соотношение $Y=A\cdot X$ можно записать в виде:

$$\vec{y}=x_1\vec{a_1}+x_2\vec{a_2}+x_3\vec{a_3}=y_1\vec{i}_1+y_2\vec{i}_2+y_3\vec{i}_3.$$

Таким образом, преобразование A переводит вектор $\vec{x}$ в базисе $E=[\vec{i}_1,\vec{i}_2,\vec{i}_3]$ в вектор $\vec{y}$, имеющий те же компоненты, но в новом базисе $[a_1,a_2,a_3]$, который, в общем случае, может и не быть ортогональным.

Аналогичные преобразования осуществляются и с направлением наблюдения, с помощью $V=B\cdot U$, причем новый базис $[\vec{b}_1,\vec{b}_2,\vec{b}_3]$ дается столбцами аффинора B, связанного со столбцами A следующим соотношением [3]:

$$b_i\cdot a_j=\delta_{ij}, \tag{7}$$

где $\delta_{ij}=\begin{cases}1, & i=j\\ 0, & i\neq j\end{cases}$ – символ Кронекера.

Таким образом, b_i – вектор, который имеет проекцию на $\vec{u}$, равную $1/a_i$, и направление, перпендикулярное всем остальным векторам $\vec{a_j}$:

$$\begin{aligned}\vec{b_1}&=|A|^{-1}\cdot\left(\vec{a_2}\times\vec{a_3}\right);\\ \vec{b_2}&=|A|^{-1}\cdot\left(\vec{a_3}\times\vec{a_1}\right);\\ \vec{b_3}&=|A|^{-1}\cdot\left(\vec{a_1}\times\vec{a_2}\right).\end{aligned} \tag{8}$$

Используя рассмотренные в выражениях (1) – (8) теоретические предпосылки, решим задачу минимизации количества излучателей планарной антенны при обеспечении возможности сканирования в заданном секторе дифракционных лепестков.

Исходная периодическая прямоугольная излучающая система планарной антенны показана на рис. 1. Положение дифракционных лепестков в плоскости u (рис. 2.) описывается следующим выражением:

$$\vec{u}=m\vec{b_1}+n\vec{b_2}, \tag{9}$$

где $\vec{b_1}=b_{11}\vec{i}_1+b_{12}\vec{i}_2;\ \vec{b_2}=b_{21}\vec{i}_1+b_{22}\vec{i}_2;\quad m,\ n=0,\pm1,\ldots$.

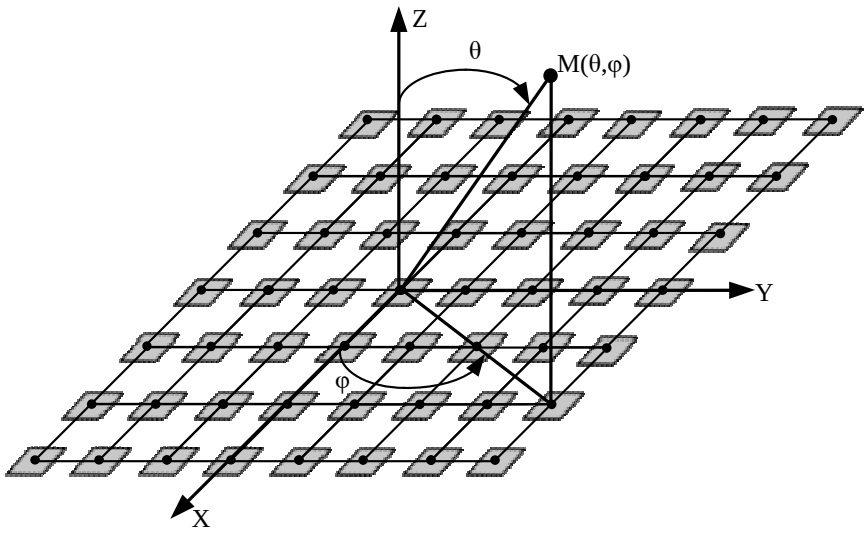


Рис. 1. Исходная прямоугольная структура излучающей системы планарной антенны

Требуется найти такое преобразование *B*, чтобы дифракционные лепестки не появлялись в секторе сканирования, затем преобразование *A*, по которому построить другую геометрию излучающей системы планарной антенны. Кроме того, для минимизации числа излучающих элементов необходимо максимально возможно увеличить площадь ячейки $|A|$ (минимизировать $|B|$).

Рассмотрим случай полного сканирования. Целевая функция задачи оптимизации излучающей системы будет иметь следующий вид:

$$|B| = b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21} \to min \tag{10}$$

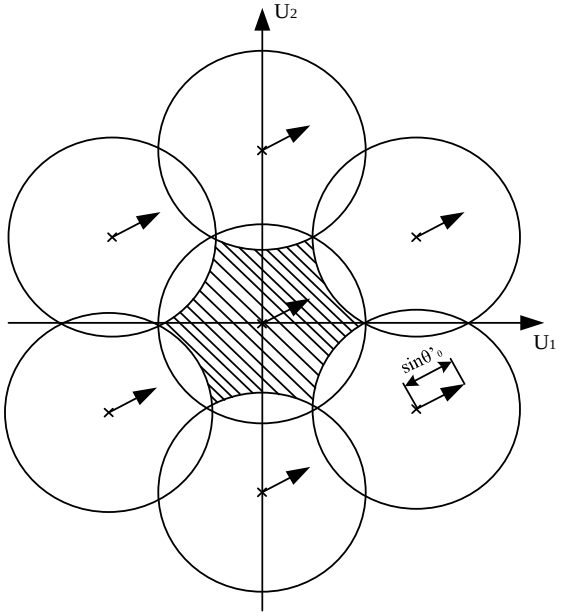


Рис. 2. Положение дифракционных лепестков в дальней зоне

Для обеспечения однолучевого сканирования необходимо, чтобы дифракционные лепестки находились как минимум в двух радиусах единичной окружности (рис. 2) от главного максимума, т.е. ограничение задачи оптимизации имеет вид:

$$(b_{11}m + b_{21}n)^2 + (b_{12}m + b_{22}n)^2 \geq 4. \tag{11}$$

Без ограничения общности подхода к решению задачи выберем $\vec{i}_1 | \vec{a}_1$, тогда $\vec{b}_2 \perp \vec{a}_1$, т.е. вдоль $\vec{i}_2$, в связи с этим $b_{21} = 0$ и выражения (10), (11) запишутся в следующем виде:

$$|B| = b_{11}b_{22} \to min, \tag{12}$$

$$b_{11}{}^2 m^2 + (b_{12}m + b_{22}n)^2 \geq 4 \tag{13}$$

Для выполнения неравенства (13) при m = 0 необходимо, чтобы $b_{22} \geq 2$, тогда:

$$b_{11}{}^2 m^2 + 4(\frac{b_{12}}{2}m + n)^2 \geq 4 \tag{14}$$

Решаем для $m, n = 0, \pm 1$, т.е. рассматриваем ближайшие дифракционные лепестки (рис. 2). Для прямоугольной антенной решетки $\vec{a}_2 | \vec{i}_2$ и $\vec{b}_2 | \vec{i}_1$, при этом $b_{11} = 2$, так как $b_{12} = 0$.

Уменьшение b_{11} возможно, если максимизировать значение второго члена в выражении (13).

Рассмотрим наихудший случай с точки зрения максимизации значения второго члена, когда m, n равны единице с противоположными знаками. Необходимо, чтобы $b_{12}=1$, тогда $b_{11}=\sqrt{3}$ и вектор $\vec{b_1}$ будет направлен под углом 30° по отношению к $\vec{i_1}$. Из выражения (7) имеем:

$$\vec{a_1}=\frac{1}{\sqrt{3}}\vec{i_1};\ \vec{a_2}=\frac{1}{\sqrt{3}}\left[\cos 60°\vec{i_1}+\sin 60°\vec{i_2}\right]. \qquad (15)$$

При секторе сканирования $0\le\theta_0\le\theta_0{}'$ в ограничении (13) необходимо заменить удвоенный радиус на $1+\sin\theta_0'$. Тогда, рассуждая аналогично, имеем:

$$\vec{a_1}=\frac{2}{\sqrt{3}\cdot(1+\sin\theta_0')}\vec{i_1};$$
$$\vec{a_2}=\frac{2}{\sqrt{3}\cdot(1+\sin\theta_0')}\cdot\left(\cos 60°\vec{i_1}+\sin 60°\vec{i_2}\right). \qquad (16)$$

Оценим возможное уменьшение количества излучателей для случая полного сканирования луча в области действительных углов. Для квадратной конфигурации излучающей системы планарной антенны $b_{12}=0, b_{22}=2, b_{11}=2$, т.е. $|B_{\text{кв}}|=4$. Минимизация значения второго члена ограничения (14) дает решение вида $b_{12}=1, b_{22}=2, b_{11}=\sqrt{3}$ т.е. $|B|=2\cdot\sqrt{3}$.

В результате будем иметь: $\frac{|B_{кв}|-|B|}{|B|}\cdot 100\%\approx 13\%$, т.е. уменьшение количества излучающих элементов примерно на 13% при сканировании в видимой области, что совпадает с выводами [2].

Аналогичную оценку можно провести для A, при этом $|A|$ будет иметь смысл площади плоской антенной решетки, приходящейся на один ее элемент (S). Увеличение S позволяет значительно проще решать задачи диапазонного согласования излучающей системы планарной антенны, так как появляется дополнительная возможность увеличения размеров излучающего элемента, что положительно сказывается на согласовании решетки излучателей в нижней части рабочего диапазона [4, 5].

Однако, необходимо заметить, что с уменьшением уровня бокового излучения в процессе оптимизации планарной антенны, также будет изменяться в меньшую сторону и коэффициент использования излучателей. Это, например, в [1] объясняется тем, что уменьшение уровня бокового излучения достигается созданием неравномерного амплитудного распределения в раскрыве излучающей системы планарной антенны. Следовательно, уменьшение амплитуды токов в *i*-ом излучателе означает, что через *i*-ый фазовращатель будет проходить меньшая мощность, и он будет использоваться меньше, отсюда и падение общего коэффициента использования излучателей. Очевиден также и тот факт, что уменьшению уровня бокового излучения будет сопутствовать расширение главного луча диаграммы направленности планарной антенны. Увеличение ширины главного лепестка в этом случае будет незначительным, лишь на несколько единиц процентов больше, чем у диаграмм направленности, оптимальных по Дольфу–Чебышеву [4, 5].

Список литературы

1. Антенны с электрическим сканированием (введение в теорию) / О.Г. Вендик, М.Д. Парнес; под редакцией чл.-кор. РАН Л. Д. Бахраха. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2002. 232 с.

2. Фитенко Н.Г., Мешалкин В.А. К вопросу о структурном синтезе антенных решеток // Вопросы расчета и проектирования антенн и радиолиний / под ред. В.П. Саркова. Л.: ВАС, 1990. С. 64-70.

3. Каган В.Ф. Основы теории поверхностей в тензорном изложении. М.: Риполклассик, 2013. 518 с.

4. Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д. Синтез излучающих систем (теория и методы расчета). М.: Сов. радио. 1974. 232 с.

5. Антенны и устройства СВЧ. Расчет и проектирование антенных решеток и их излучающих элементов / под ред. проф. Д.И. Воскресенского. М.: Сов. радио, 1972. 320 с.

Шеянов Дмитрий Юрьевич, канд. техн. наук, сотрудник, sdmtr-80@mail.ru, Россия, Орел, Академия ФСО России,

Горшков Алексей Анатольевич, канд. техн. наук, сотрудник, sdmtr-80@mail.ru, Россия, Орел, Академия ФСО России,

Ключко Николай Юрьевич, канд. техн. наук, сотрудник, sdmtr-80@mail.ru, Россия, Орел, Академия ФСО России

OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE OF A PLANAR ANTENNA SYSTEM BASED ON AFFINE TRANSFORMATIONS

D.Y. Sheyanov, A.A. Gorshkov, N.Y. Klyuchko

The article explores the possibility of using elements of the theory of affine space transformations for the structural synthesis of planar antennas. We consider the problem of optimizing the structure of a flat antenna array, which consists in choosing such an arrangement of its emitting elements, which would eliminate the diffraction maxima from falling into the region of real angles while ensuring full scanning in a given sector.

Key words: planar antennas, directivity characteristic, diffraction lobe, affinity transformation.

Sheyanov Dmitriy Yurievich, candidate of technical sciences, employee, sdmtr-80@mail.ru, Russia, Orel, Academy of Federal Security Service of Russia,

Gorshkov Aleksey Anatolyevich, candidate of technical sciences, employee, sdmtr-80@mail.ru, Russia, Orel, Academy of Federal Security Service of Russia,

Klyuchko Nikolay Yurievich, candidate of technical sciences, employee, sdmtr-80@mail.ru, Russia, Orel, Academy of Federal Security Service of Russia

УДК 004.94; 331.45

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ УСЛОВИЙ ТРУДА НА ПРОИЗВОДСТВЕ

А.А. Шишкина

В работе проводится пример решения задачи об улучшении условий труда и повышения безопасности труба в производственных условиях с применением передовых программно-математических комплексов.

Ключевые слова: охрана труда, производство, программно-математический комплекс, моделирование, компьютерное моделирование, информация.

На большинстве промышленных предприятий, с учетом бурно развивающейся автоматизации и роботизации, используется труб наемных сотрудников, осуществляющих деятельность непосредственно в цехах, в непосредственной близости от оборудования. Помимо шума, риска получения травм, такое оборудование еще и нагревается, тем самым повышая температуру в помещение. Значительный рост температуры, выше допустимых (не более 24°С для легкой работы и не более 18°С для тяжелой) может нанести вред не только здоровью человека, но и привести к преждевременной поломке оборудования [1, 2].

Поэтому актуализируется вопрос по улучшению условий труда и правильной настройке климатического оборудования в производственных помещениях. Данную проблему можно решить несколькими способами, традиционным – экспериментальным, а также с помощью известных формул для расчетов необходимых параметров. Такие методы отличаются высокой сложностью и энергозатратами, однако существует альтернативный метод, заключающийся в компьютерно-математическом моделировании исследуемых процессов [3,4,5].

Программно-математический метод осуществляется при помощи специальных программ, нацеленных на решение той или иной узкой задачи, однако возможно применение мультифизических программных комплексов, решающих большое число разнообразных задач. К таким комплексам можно отнести Ansys [3,4,5].

Рассмотри задачу вентилирования прохладным воздухом производственного помещения, в котором есть два источника тепла, один источник прохладного воздуха и для осуществления лучшей циркуляции воздушных масс будем считать, что дверь в цех открыта и из нее не поступает воздух, и не происходит теплообмен с окружающей средой.

Исследуемое помещение имеет ширину 10 м, глубину 7 м и высоту 4 м. Для упрощения расчета принималось, что имеется 2 источника тепла, из которого выдувается горячий воздух (31 °С) со скоростью 0,01 м/с. На данном основании был проведен подбор источника холодного воздуха, который показал, что необходим только один кондиционер, который расположен на одной из стен цеха. При этом скорость, с которой дует источник холодного воздуха, равняется 9 м/с, температурой 16°С. Общая схема помещения приведена на рис. 1.

По схеме, показанной на рисунке 1 реализуется моделирование циркуляции воздуха с определением температуры воздуха внутри помещения (рис. 2) и на его границах, вдоль стен (рис. 3).

Средняя температура в помещении определялась по плоскостям, расположенных на высоте 0,1 м, 1 м, 2 м и 3 м от пола. Полученные данные были занесены таблицу.

Средняя температура

Параметры	0,1 м	1 м	2 м	3 м
Температура, средняя, °С	23,01	24,71	24,17	23,4

Таким образом, наименьшая температура наблюдается в верхней части помещения, вблизи потолка и в нижней, вблизи пола. А приблизительное значение температуры в помещении равняется 23,82°С, что является верхней границей нормы для легкого труда.

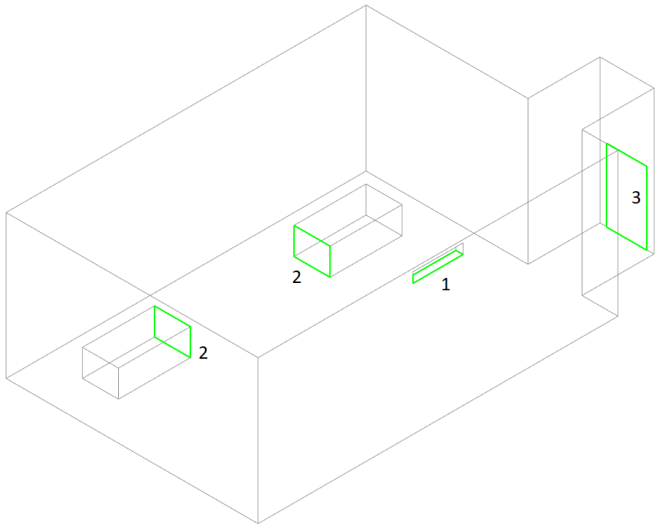


Рис. 1. Трехмерная модель исследуемого помещения: 1 – плоскость, через которую подается холодный воздух; 2 – плоскости, через которые подается горячий воздух; 3 - дверь

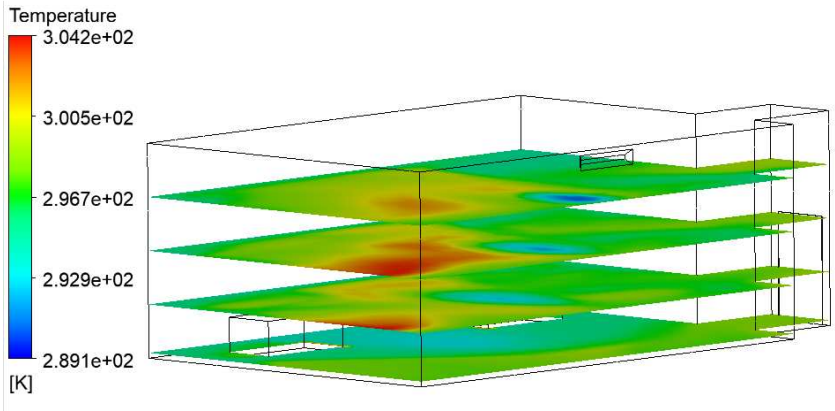


Рис. 2. Температура в помещении в различных слоях

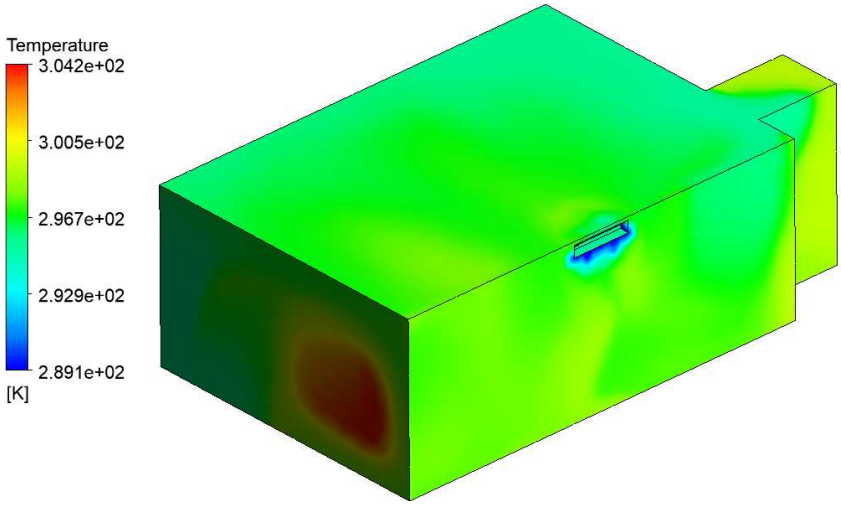


Рис. 3. Температура воздуха вблизи стен помещения

Наибольшая температура вблизи стен помещения регистрируется на противоположенной стене от двери, где циркуляция воздуха значительно хуже реализована, чем в остальных частях помещения.

Помимо температур, еще одним важным параметром является скорость и направление движения воздуха, в рассматриваем случае, так как имеется 3 источника, то направление движения описывается сложной траекторией (рис. 4).

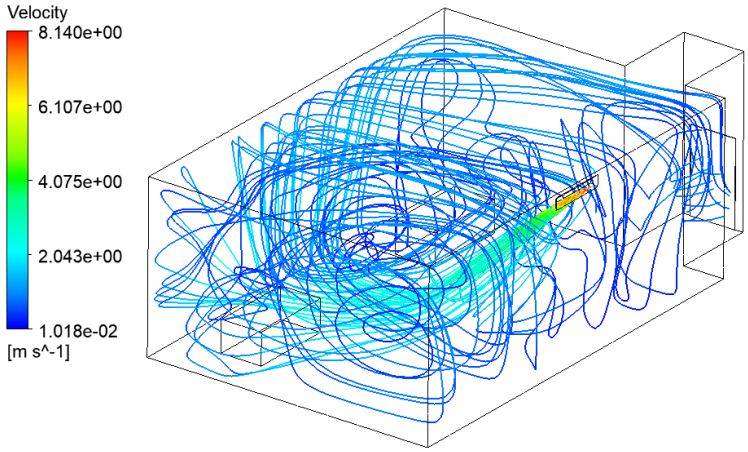


Рис. 4. Движение потоков воздуха в комнате от источника к выходу

Как показано на схеме движения воздуха, только под струей холодного воздуха наблюдается значительная скорость движения воздушных масс, в остальных частях комнаты воздух переносится с незначительной скоростью (менее 0,1 м/с).

Таким образом, это исследование показало, что применение программно-математических комплексов значительно ускоряют изучения различных процессов и способствуют более правильному и оптимальному подбору оборудования и его расстановки в производственном помещении. В свое очередь правильный выбор оборудования и соответственно подбор климатических режимов способствует улучшению условий труда и здоровья сотрудников.

Список литературы

1. Беляков Г.И. Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда в 2 т. Т.1: Учебник для академического бакалавриата. Люберцы: Юрайт, 2016. 404 с.

2. Шишкина А.А. Правила по охране труда при использовании тепловых энергоустановок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 2. С. 154-158.

3. Шишкина А.А. Особенности использования насосов для перекачки жидкого топлива // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 3. С. 268-271.

4. Вайцель А.А., Сиренко Е.Р., Гаврюхина А.В. Анализ программного комплекса для расчёта гидродинамических процессов в водоснабжении // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 3. С. 102-105.

5. Чубова Е.В. Анализ этапов внедрения системы управления охраной труда // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 7. С. 272-278.

Шишкина Анастасия Андреевна, студент, shishkina5ap@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

APPLICATION OF SOFTWARE AND MATHEMATICAL COMPLEXES TO IMPROVE PIPE CONDITIONS AT PRODUCTION

A.A. Shishkina

The paper provides an example of a decision to improve working conditions and improve the safety of a pipe in a production environment using advanced mathematical software systems.

Key words: labor protection, production, software and mathematical complex, modeling, computer modeling, information.

Shishkina Anastasia Andreevna, student, shishkina5ap@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.396.677

МЕТОДИКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ В АДАПТИВНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ

С.Л. Алешин

Представлена методика формирования «нулей» диаграммы направленности адаптивной антенной решетки в режиме реального времени в сложной сигнально-помеховой обстановке на основе градиентного метода. Приведена возможность реализации данной методики в адаптивных антенных решётках.

Ключевые слова: адаптивная антенная решетка, адаптивный процессор, диаграмма направленности, вектор весовых коэффициентов, пространственно-временная обработка, отношение сигнал/(помеха+шум).

Функционирование радиотехнических систем в современных условиях связано с необходимостью обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств (РЭС) и борьбой с помехами естественного и преднамеренного характера. Существуют различные подходы для выполнения данных требований, такие как временное, частотное, кодовое разделение сигналов и их комбинации, а также методы помехоустойчивого кодирования. Такие подходы позволяют обеспечить требуемую электромагнитную совместимость РЭС и бороться с помехами. Однако, в связи с возрастающими возможностями по постановке преднамеренных помех перечисленные методы в перспективе не будут обеспечивать помехоустойчивость РЭС в полной мере.

Одним из возможных направлений обеспечения помехоустойчивости РЭС является применение в качестве приемо-передающей антенны антенной решетки (АР). Основными достоинствами данного типа антенн являются возможность формирования узконаправленной диаграммы направленности (ДН) и способность противостоять помехам за счет применения различных методов формирования ДН. К этим методам относятся методы синтеза, энергетической оптимизации, компенсации и адаптации.

Применение методов синтеза и энергетической оптимизации оптимально в случае наличия априорной информации о направлении действия помеховых сигналов. Однако сигнально-помеховая обстановка в современных условиях может стремительно изменяться, что ограничивает возможности антенной решетки по противодействию помехам.

Методы компенсации помех подразумевают применение дополнительных компенсационных антенн или антенных элементов, что значительно усложняет конструкцию и ограничивает области применения таких РЭС.

Наиболее перспективным направлением обеспечения помехоустойчивости РЭС является реализация в антенных решетках методов адаптации. Данный подход начал свое развитие в конце 70-х годов прошлого столетия и в настоящее время проработан на высоком уровне [1]. Однако существует ряд особенностей применения методов адаптации, которые требуют более тщательного исследования.

Одним из возможно исследуемых вопросов является подавления помех антенной решеткой в сложных условиях сигнально-помеховой обстановки (СПО). Под сложными условиями сигнально-помеховой обстановки будем понимать зависимость угловых координат источников сигналов и помех от времени, т.е. местоположение спутниковых станций и спутников-ретрансляторов, а также станций постановщиков помех меняется в пространстве и времени.

В статье будет представлена методика подавления помех при пространственно-временной обработке сигналов на основе рекуррентного алгоритма адаптации, реализованная по критерию отношение сигнал/(помеха+шум) (ОСПШ). Так же в работе рассматривается возможность использования представленной методики в адаптивной антенной решетке (ААР).

Рассмотрим N-элементную антенную решетку (рис. 1) с известной геометрией излучающего раскрыва, осуществляющую прием полезного сигнала с направления θ_0, φ_0 и подавление помеховых сигналов, приходящих с неизвестных направлений θ_l, φ_l, $(l = 1, \ldots, L)$, источники которых постоянно изменяют свое положение в пространстве. Требуется определить и реализовать набор весовых коэффициентов в каналах адаптивной антенной решетки, обеспечивающих максимум отношения сигнал / (помеха + шум) на выходе адаптивной антенной решетки.

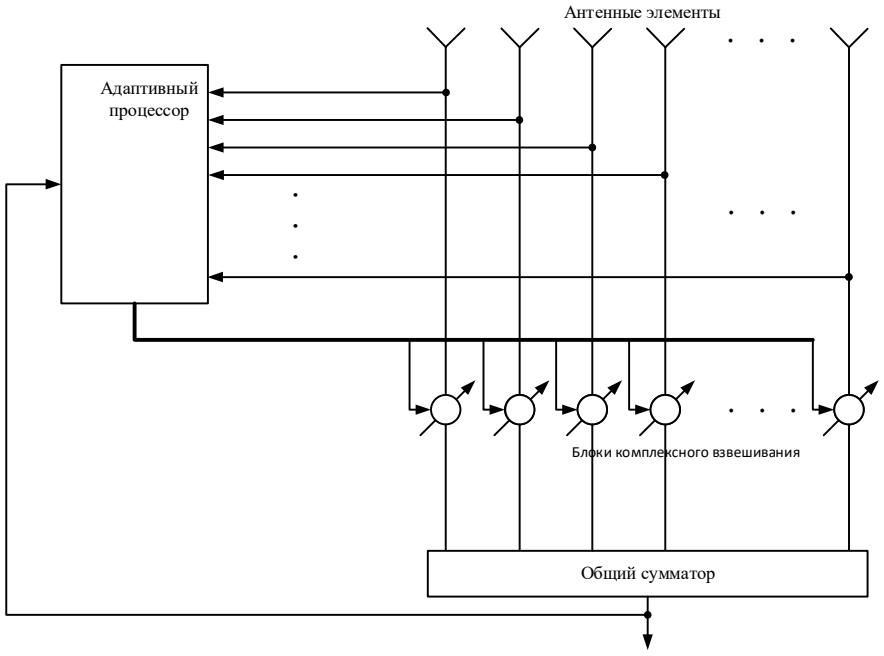


Рис. 1. Адаптивная антенная решетка

Целевой функцией является максимум ОСПШ

$$Q = \max_{W_{opt}} \left\{ \frac{W^{+} R_{ss} W}{W^{+} R_{nn} W} \right\}, \tag{1}$$

где W – вектор весовых коэффициентов; R_{ss} – ковариационная матрица полезного сигнала; R_{nn} – ковариационная матрица помеховых сигналов; $+$ – операция комплексного сопряжения и транспонирования.

Для максимизации выражения (1) необходимо, чтобы вектор весовых коэффициентов принял оптимальное значение

$$W_{opt} = R_{nn}^{-1} S_0^*, \quad (2)$$

где S_0 – вектор, отвечающий за формирование диаграммы направленности адаптивной антенной решетки в направлении прихода полезного сигнала в отсутствии помех; $*$ – операция комплексного сопряжения.

Весовые коэффициенты, полученные на основе выражения (2), позволяют сформировать «нули» диаграммы направленности адаптивной антенной решетки в направлениях на источники помеховых сигналов и подавить их. Однако, если источники помеховых сигналов находятся в движении, необходимо постоянно вычислять обратную ковариационную матрицу помеховых сигналов, что связано с большими временными и вычислительными затратами. В связи с этим, данный подход целесообразнее применять для случая стационарных источников помех.

Так как целевой функции (1) соответствует только один глобальный максимум, то для его поиска возможно применение градиентного метода, описанного в [1,7]

$$W(j+1) = W(j) - \alpha(j)\nabla_{\mathrm{w}}(Q), \quad (3)$$

где $W(j+1)$ – значение вектора весовых коэффициентов на $j+1$ итерации ($j = \overline{0, J}$); $W(j)$ – значение вектора весовых коэффициентов на j-ой итерации; $\alpha(j)$ – число, определяющее направление и шаг адаптации на j-ой итерации; $\nabla_{\mathrm{w}}(Q)$ – градиент целевой функции.

Выражение (3) после несложных математических преобразований, описанных в [1-6], примет вид

$$W(j+1) = [(dt-1)E + \gamma dt R_{nn}]W(j) + \Delta W(j), \quad (4)$$

где dt – шаг итерации; E – единичная матрица; γ – коэффициент, характеризующий интенсивность адаптации; $\Delta W(j)$ – вектор, характеризующий шумы адаптации.

Следует отметить, что в начальный момент времени при первой итерации значение $W(j)$ равно $W(0) = S_0$. Далее с каждым шагом $W(j)$ будет стремиться к W_{opt}. Основным достоинством данного метода является то, что отпадает необходимость в прямом обращении ковариационной матрицы помеховых сигналов. Однако выражение (4) эффективно для случая, когда источники сигналов не перемещаются в пространстве. Это связано с тем, что в случае изменения направления излучения хотя бы одного из источников помеховых сигналов необходимо производить подстройку вектора весовых коэффициентов, опять начиная с $W(0) = S_0$, хотя сам вектор весовых коэффициентов изменяется незначительно. Данный подход приводит к увеличению времени переходного процесса (рис. 2, кривая 1) при подстройке вектора весовых коэффициентов в каналах обработки и снижению быстродействия функционирования адаптивной антенной решетки при формировании «нулей» диаграммы направленности в направлении на источники помеховых сигналов, находящихся в движении.

Для сокращения время переходного процесса при подстройке вектора весовых коэффициентов в каналах обработки и повышения быстродействия функционирования адаптивная антенная решетка при формировании «нулей» диаграммы направленности в направлении на помеховые сигналы, источники которых находятся в движении, необходимо, чтобы при каждом изменении ковариационной матрицы R_{nn} производился пересчет вектора весовых коэффициентов на основе выражения (4), но уже с учетом предыдущего значения, так как его амплитудные и фазовые характеристики изменяются незначительно. Скорость пересчета вектора весовых коэффициентов должна быть в разы больше скорости изменения направления на источник полезного сигнала и помех.

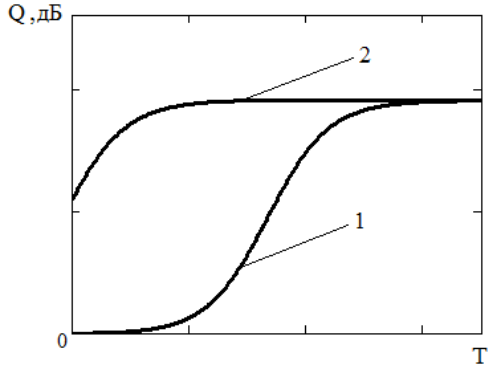


Рис. 2. График переходного процесса в ААР

С учетом вышесказанного, выражение (3) примет вид

$$W(i,\ j+1) = W(i,\ j) - \alpha(i,\ j)\nabla_{\mathrm{w}}(Q). \qquad (5)$$

В выражении (5) индекс $i = \overline{0,\Theta}$ обозначает изменение углового положения источников излучения помеховых сигналов.

Тогда выражение (4) преобразуется к виду

$$W(i,\ j+1) = \left[(dt-1)E + \gamma dt R_{nn_i}\right] W(i,\ j) + \Delta W(i,\ j). \qquad (6)$$

Отличительной особенностью функционирования адаптивной антенной решетки на основе выражения (6) является тот факт, что вектор весовых коэффициентов $W(i,\ j)$ только в начальный момент при первой итерации принимает значение $W(0,\ 0) = S_0$, далее, при изменении углового положения источников помех и, следовательно, ковариационной матрицы помеховых сигналов R_{nn_i}, вектор весовых коэффициентов принимает значение вектора, полученного при предыдущем угловом положении источников помех, то есть $W(i+1,\ 0) = W(i,\ J)$. Такой подход позволяет уже в начальный момент времени при изменении углового положения источников помеховых сигналов обеспечить формирование «нулей» диаграммы направленности в их направлении и значительно сократить время переходного процесса (рис. 2, кривая 2). В случае, если изменяется направление излучения полезного сигнала, алгоритм, описанный выше, повторяется, то есть вектор весовых коэффициентов в начальный момент времени принимает значение $W(0,\ 0) = S_0$.

Реализовать представленную методику обработки возможно в адаптивном процессоре, представленном на рис. 3 [8].

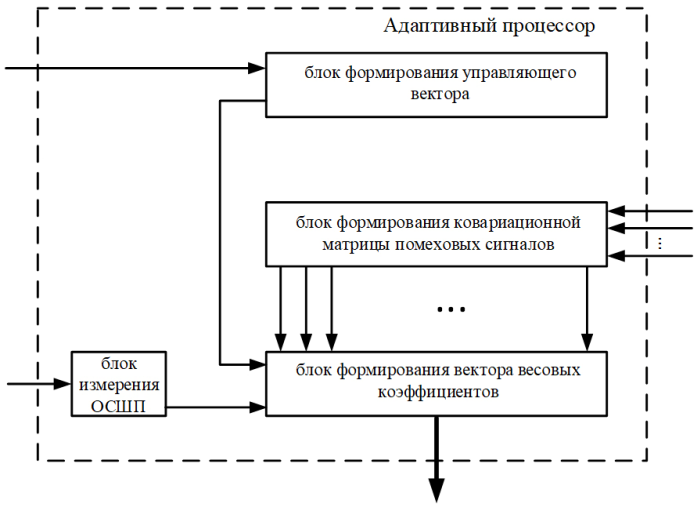


Рис. 3. Состав адаптивного процессора

Рассмотрим подробнее функционирование адаптивного процессора (рис. 3). Смесь полезного и помехового сигналов подаются на входы блока формирования ковариационной матрицы помеховых сигналов, в которых в соответствии с приведенными соотношениями формируются коэффициенты ковариационной матрицы помеховых сигналов. Сигналы, соответствующие коэффициентам ковариационной матрицы помеховых сигналов, поступают на входы блока формирования вектора весовых коэффициентов (рис. 4).

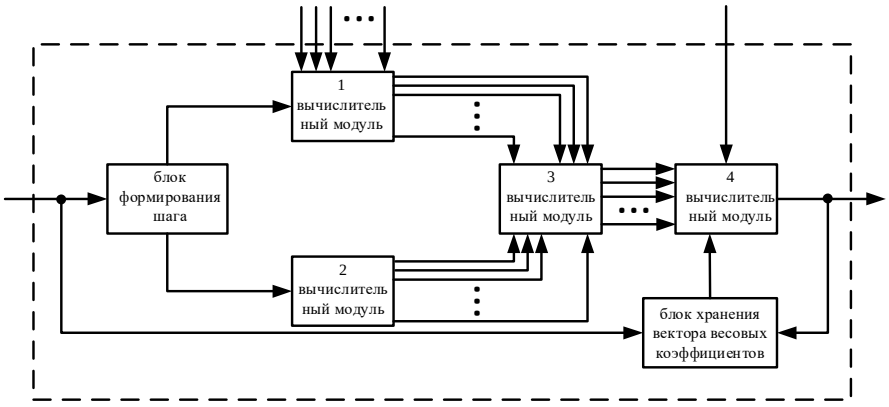


Рис. 4. Состав блока формирования вектора весовых коэффициентов

На управляющий вход блока формирования вектора весовых коэффициентов поступает также сигнал от блока формирования управляющего вектора ($S_0 = A_n exp(-ik(x_n \sin\theta_0 \cos\varphi_0 + y_n \sin\theta_0 \sin\varphi_0))$), содержащего сведения о направлении прихода полезного сигнала и амплитудно-фазовом распределении токов в излучателях антенной решетки. Сигнал о направлении прихода полезного сигнала и изменении амплитудно-фазового распределения токов в излучателях антенной решетки поступает на информационный вход блока формирования управляющего вектора от внешнего источника. По управляющей команде от блока измерения отношения сигнал / (помеха+шум) в блоке формирования вектора весовых коэффициентов формируются сигналы, соответствующие элементам вектора весовых коэффициентов. Формирование этих сигналов выполняется на основе градиентного метода.

Рассмотрим подробнее функционирование блока формирования вектора весовых коэффициентов (рис. 4). На входы первого вычислительного модуля поступают сигналы от блока формирования ковариационной матрицы помеховых сигналов, а также сигнал от блока формирования шага. В результате в первом вычислительном модуле, хранящем информацию о значении коэффициента γ, производится операция умножения γdtR_{nn}. Сигнал от блока формирования шага поступает на вход второго вычислительного модуля, который хранит информацию о размерности единичной матрицы E. В результате во втором вычислительном модуле производится операция $(dt-1)E$. Сигналы от первого и второго вычислительных модулей поступают на соответствующие входы третьего вычислительного модуля, где производится операция сложения $\left[(dt-1)E+\gamma dtR_{nn}\right]$. Далее сигналы от третьего вычислительного модуля поступают на входы четвертого вычислительного модуля. Также на входы четвертого вычислительного модуля поступают сигналы блока формирования управляющего вектора и от блока хранения вектора весовых коэффициентов, в котором хранится значение вектора весовых коэффициентов, рассчитанное на предыдущем шаге итерации. В четвертом вычислительном модуле производится формирование вектора весовых коэффициентов на основе выражения (6), значение которого записывается в блок хранения вектора весовых

коэффициентов. Управляющие воздействия от вычислительного модуля поступают на соответствующие управляющие входы блоков комплексного взвешивания сигналов. Составляющие полезного сигнала, умноженные на свои весовые коэффициенты, поступают в сумматор, где производится суммирование сигналов. С выхода сумматора сигнал поступает на вход адаптивного процессора, а именно на вход блока измерения отношения сигнал / (помеха+шум), где производится измерение ОСПШ и сравнение его со значением, полученным на предыдущем шаге итерации. Если значение ОСПШ больше, чем на предыдущем шаге итерации, то блок измерения отношения сигнал / (помеха+шум) подает команду на блок формирования шага, который формирует значение следующего шага итерации, и блок хранения вектора весовых коэффициентов, который формирует сигнал, характеризующий значение вектора весовых коэффициентов, рассчитанного на предыдущем шаге итерации. Если значение ОСПШ меньше, чем на предыдущем шаге итерации, то блок измерения отношения сигнал / (помеха+шум) подает команду только на блок хранения вектора весовых коэффициентов, который формирует сигнал, характеризующий значение вектора весовых коэффициентов, рассчитанного на предыдущем шаге итерации. Данный сигнал поступает на четвертый вычислительный модуль и далее на управляющие входы блоков комплексного взвешивания сигналов, затем на сумматор и на выход устройства. В случае, если источник полезного сигнала изменил свое местоположение, то в качестве значения вектора весовых коэффициентов, рассчитанного на предыдущем шаге, выступает значение управляющего вектора S_0, которое поступает на четвертый вычислительный модуль от блока формирования управляющего вектора, сформированного на основе информационного сигнала, поступившего от внешнего источника.

Таким образом представленная выше схема адаптивной антенной решетки и адаптивного процессора позволяют реализовать описанную выше методику обработки сигналов, тем самым повысить скорость переходного процесса.

Список литературы

1. Пистолькорс А.А., Литвинов О.С. Введение в теорию адаптивных антенн. М.: Наука, 1991. 200 с.

2. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.

3. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение. М.: Радио и связь, 2003. 200 с.

4. Григорьев В.А., С.С. Щесняк, В.Л. Гулюшин, Ю.А. Распаев, О.И. Лагутенко, Щесняк А.С. Адаптивные антенные решетки. Учебное пособие в 2-ух частях. Часть 1; под. общ. ред. В.А. Григорьева. СПб: Университет ИТМО, 2016. 179 с.

5. Алешин С.Л., Бибарсов М.Р., Ладыка М.Б., Габрильян Д.Д. Алгоритм адаптации для антенной решетки систем космической связи в стационарных условиях сигнально помеховой обстановки // Информация и космос – 2016. №4. С. 15-21.

6. Лосев Ю.И., Бердников А.Г., Гойхман Э.Ш., Сизов Б.Д. Адаптивная компенсация помех в каналах связи. М.: Радио и связь, 1988. 208 с.

7. Габрильян Д.Д., Бибарсов М.Р., Новиков А.Н., Алешин С.Л. Метод формирования «нулей» диаграммы направленности адаптивной антенной решетки для подвижных источников излучения // Антенны. 2019. С. 59-64.

8. Алешин С.Л. Реализация адаптивного процессорав адаптивных антенных решетках при пространственно-временной обработке сигналов // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды IV межвузовской научно-практической конференции. Военная академия связи. 2019. С. 55-58.

Алешин Степан Леонидович, начальник учебной лаборатории, asl.87@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи

METHODS OF SPACE-TIME PROCESSING AND ITS IMPLEMENTATION IN ADAPTIVE ANTENNA ARRAYS

S.L. Aleshin

The article presents a method of formation of «zeros» of the diagram of the adaptive antenna array in real time in a complex signal-noise environment based on the gradient method. The possibility of implementing this technique in adaptive antenna arrays is presented.

Key words: adaptive antenna array, adaptive processor, radiation pattern, vector of weight coefficients, space-time processing, signal/(noise+noise) ratio.

Aleshin Stepan Leonidovich, head of the educational laboratory, asl.87@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, military Academy of communications

УДК 004.94; 628.1

АНАЛИЗ ПОТЕРЬ В ТРУБОПРОВОДЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ

А.А. Вайцель

Описывается аналитический метод сравнения нескольких видов трубопроводов для выявления наибольших потерь среди них. Анализ проводится в программе Ansys и представляются схемы распределения скорости в потоке жидкости, а также давление.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, анализ, обработка, водоснабжение, трубопровод.

Компьютерное математическое моделирование является одним из самых эффективных и быстрых методов анализа любых процессов. В том числе и строительство, а именно водоснабжение зачастую прибегает к этому способы анализа. Основными преимуществами данного способа исследования процессов является низкое затраченное время и результат, который невозможно получить при использовании традиционных методов, таких как эксперимент [1, 2, 3].

В основе водоснабжения лежат трубы, которые выполняют функцию подвода как горячей, так и холодной воды к потребителю. Но очень часто трубы лежат не на одном уровне и имеют перепад высоты, который является сопротивлением для напора воды [4, 5]. При этом перепад высоты может быть различного вида, как вариант, многоступенчатый жесткий, или соединение с помощью гибкого шланга. Потери при различных видах соединения различны и в данной работе проведен анализ величины потерь в трубопроводе. Рассматривались два варианта трубопровода, один из которых имеет в качестве соединения труб, лежащих на разной высоте, одноступенчатый переход, а в другом случае – гибкий шланг, имеющий вид спирали.

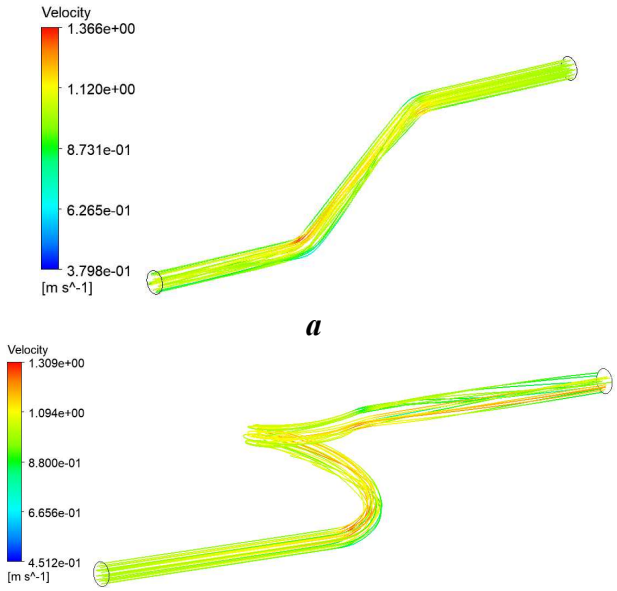
В данной работе рассматриваются потери в трубопроводах при помощи программы Ansys, которая позволяет определить различные гидродинамические параметры трубопроводов без применения экспериментальных исследований. Перепад высоты рассматривается как две различные системы, система жесткого перехода под 30° (рис. 1, а). и система гибкого шлангового соединения (рис. 1, б).



а ***б***

Рис. 1. Схемы трубопроводов

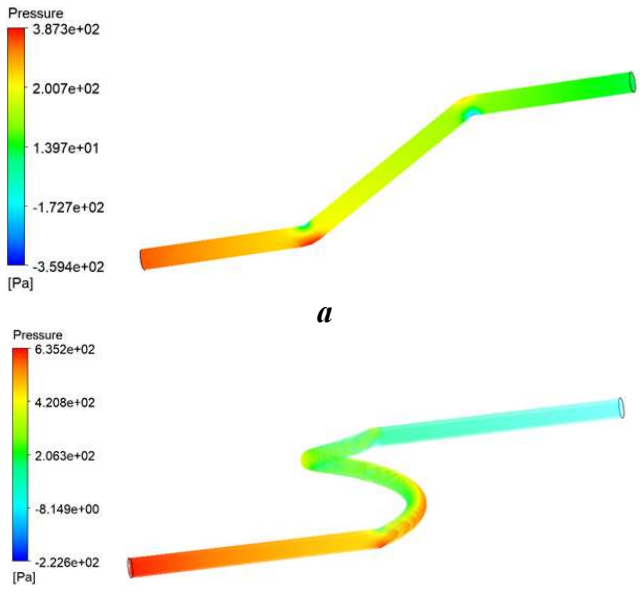
Скорость на входе в рассматриваемый участок трубопровода составляет 1 м/с, а жидкость, которая проходит через данные трубопроводы является водой при температуре 20°С. Гравитационная сила в работе учитывается. С перечисленными выше начальными данными были проведены компьютерные моделирования в программе Ansys, где были выявлены скоростные характеристики движения жидкости (рис. 2) и давление (рис. 3).



а

б

Рис. 2. Скорость в рассматриваемых участках трубопровода



а

б

Рис. 3. Давление в рассматриваемых участках трубопровода

На выходном участке средняя скорость составляет в первом случае (рис. 2, а) 0,99 м/с, а во втором случае 0,94 м/с. Что составляет примерно 6% потерь, связанных с преодолением воды сопротивления, такого как сопротивление трения, гравитационных сил. При этом, стоит учесть, что длинна трубопровода значительно выше при гибком способе соединении, чем при жестком прямом. На рис. 4 представлено распределение давления в центральном сечении прямого трубопровода.



Рис. 4. Давление в прямом участке трубопровода

Максимальное полученное давление при этом в прямом соединении составляет, 370 Па, а при соединении гибким шлангом – 620 МПа, что на 70% больше.

Таким образом, прямое соединение трубопровода является наиболее благоприятным по скоростным параметрам и характеристикам давления, чем гибкое спиральное соединение шлангом. Подобные соединения с изменением высоты встречаются повсеместно, и в жилых зданиях, и в промышленных, что значительно актуализирует исследование. Однако стоит заметить, что прямое подключение двух труб, размещенных на разных уровнях в условиях ограниченной площади, является сложной задачей и приходится прибегать к использованию гибких шланговых соединений.

Данное исследование полезно для тех ситуаций, когда потери в системе водоснабжения очень важны, например, в промышленных системах, где любые изменения в давлении жидкости или скорости ее течения может привести к поломке инструмента, оборудования, привести к различным поломкам [6] и т.п.

Список литературы

1. Вайцель А.А., Сиренко Е.Р., Гаврюхина А.В. Анализ программного комплекса для расчёта гидродинамических процессов в водоснабжении // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 3. С. 102-105.

2. Вайцель А.А. Лопастные насосы как вид гидравлической машины // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 2. С. 397-400.

3. Газаров А.Р., Колосов Р.А., Ховрина Е.И. Гидравлический удар в трубопроводах: расчет и предотвращение // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 12. С. 557-559.

4. Ишутинов Д.В., Сластихин Н.С. Математическая модель оценки энергоэффективности асинхронного электропривода насосных агрегатов // Известия Тултского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 9. С. 581-589.

5. Коржев А.А., Войтюк И.Н., Смирнов А.И., Иванченко Д.И., Яковлева Э.В. Моделирование регулируемого синхронного электропривода насосного агрегата в системе поддержания пластового давления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 5. С. 505-513.

6. Абрамов Н.Н., Поспелова М.М., Сомов М.А. Расчет водопроводных сетей. М.: Стройиздат, 1983. 304 с.

Вайцель Ангелина Александровна, магистрант, angel12vat@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYSIS OF LOSSES IN THE PIPELINE USING SOFTWARE PRODUCTS

A.A. Vaitsel

An analytical method for comparing several types of pipelines to identify the largest losses among them is described. The analysis is carried out in the Ansys program and the flow diagrams and pressure are presented.

Key words: computer modeling, analysis, processing, water supply, pipeline.

Vaitsel Angelina Alexandrovna, undergraduate, angel12vat@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

УДК 654.026

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ФУНКЦИОНАЛЬНУЮ ЦЕЛОСТНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОДВИЖНОГО УЗЛА СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.В. Милашевский, А.В. Мякотин, А.А. Привалов, В.И. Чеботарев

Подробно рассмотрены основные факторы, влияющие на функциональную целостность и устойчивость функционирования подвижного узла связи специального назначения, позволяющие очертить круг исходных данных для разработки подхода к оценке его функциональной целостности.

Ключевые слова: узел связи, функциональная устойчивость, функциональная целостность, скрытность, мобильность, разведзащищенность, надежность, вооруженный конфликт, информационное противоборство, информационное пространство, информационно-ударная операция, радиоэлектронная борьба, информационно-техническое воздействие.

Успешное решение задачи по обеспечению функциональной целостности (ФЦ) и устойчивости подвижного узла связи специального назначения (ПУС СН) в значительной степени определяется всесторонним анализом оперативных и технических факторов, влияющих на его элементы в прогнозируемых условиях функционирования.

Под ФЦ ПУС СН понимается способность узла связи, в результате структурных отношений и взаимодействия входящих в его состав элементов (технических устройств), вносить вклад в реализацию целевой функции (генеральной цели) систем, в интересах которых он функционирует, заключающейся в своевременном предоставлении услуг связи с заданным качеством, при отказах его элементов в результате комплексного воздействия дестабилизирующих факторов.

В соответствии с принципами системного подхода ПУС СН может рассматриваться как в качестве системы, так и в качестве подсистемы для системы более высокого уровня (суперсистемы). Так, в качестве вышестоящих систем, формирующих требования и, как следствие, обуславливающих его внешнюю целевую функцию, будут выступать пункт управления и система связи, которые, в свою очередь, входят в состав собственной суперсистемы – системы управления.

Стоит заметить, что узел связи не просто один из элементов систем более высокого порядка, а существенная составляющая органически целостной системы. Кроме того, входящие в его состав элементы (центры, аппаратные, станции, средства связи) являются составными частями каждого элемента суперсистем. ПУС СН, в зависимости от уровня представления, также является надсистемой для центров и аппаратных (станций), технических средств, входящих в его состав, находящихся многообразных связях между собой и обеспечивающих достижение целевой функции.

Для того, чтобы уточнить требования к ПУС СН, характеризуемые теми или иными переменными во времени свойствами, со стороны суперсистем, спрогнозировать условия его функционирования во взаимодействии со сложной, динамичной, обладающей высшей степенью неопределенности средой, необходимо определить и описать степень влияния на эти системы совокупности воздействующих факторов.

Основными категориями оперативных факторов, влияющих на сохранение ПУС СН функциональной целостности и устойчивости функционирования являются:

факторы, обусловленные особенностями функционирования системы управления;

факторы, обусловленные особенностями функционирования системы связи;

факторы, обусловленные взаимодействием с внешней средой.

Взгляды отечественных и зарубежных специалистов, сходятся в том, что основными предпосылками, определяющими тенденции современных вооруженных противоборств, являются взгляды противоборствующей стороны на способы ведения войны, а также уровень актуального и потенциального состояния средств ее ведения с целью эффективного их применения.

Анализ опыта локальных войн конца XX – начала XXI вв., не смотря на особенности проведения каждой их них, позволил выделить ряд характерных черт, присущих всем конфликтам [1-5]:

необязательность акта объявления войны для развязывания и ведения военных конфликтов;

смещение масштабов от глобальных к региональным и локальным конфликтам;

сокращение времени подготовки к боевым действиям, их быстротечность, возрастание напряженности;

ведение информационного противоборства, являющегося неотъемлемой частью военных конфликтов;

воздействие на противника на всю глубину его территории одновременно в глобальном виртуально-информационном, воздушно-космическом пространстве, на суше и море с применением стратегий прямого и непрямого действия;

целенаправленная борьба с системами управления и связи, заключающаяся в деструктивном воздействии на информационные системы противника и циркулирующую в них информацию или уничтожение их;

проведение наступательных ударно-информационных операций, нацеленных на срыв процесса принятия решений, нарушения работы (уничтожения) элементов информационной инфраструктуры, для достижения и удержания информационного превосходства;

массовое применение в условиях глобальной досягаемости современных высокоэффективных систем бесконтактного (дистанционного) поражения различного базирования: высокоточных средств поражения в обычном снаряжении, оружия, основанного на новых физических принципах (электромагнитного, лазерного, инфразвукового, ускорительное и т.п.);

сохранение определяющей роли традиционных средств поражения: боеприпасов разрушительного (фугасного, осколочного, кумулятивного, ударного) и зажигательного действия;

максимальное снижение боевых возможностей противоборствующей стороны в начальный период войны в рамках проведении воздушной наступательной операции, основу которой составляет нанесение массированных ракетно-авиационных ударов, ставящей целью избирательное поражение критически важных объектов систем государственного и военного управления, инфраструктуры, завоевание господства в воздухе;

применение основанных на сетевом распределенном принципе, объединенных в единую информационную сеть, систем управления, автоматизированных комплексов разведки и радиоэлектронной борьбы, нацеленных еще до начала активных боевых действий на вскрытие военного потенциала противоборствующей стороны, упреждение его действий, уничтожение систем управления и связи;

переход к централизованным сетевым автоматизированным, основанных на современных информационно-телекоммуникационных технологиях, способных к быстрой реорганизации, системам управления войсками (силами) и оружием;

повышение роли оружия нелетального действия и «гуманных» принципов ведения войны, основанных, в первую очередь, на выведении из строя технических средств.

Изменения в характере вооруженных противоборств закономерно приводят к изменению требований к функционированию системы связи и входящих в ее состав элементов (узлов связи). Подобные изменения обусловлены следующими факторами:

увеличением объемов циркулирующей в системе связи информации, вызванное применением современных многофункциональных средств ее добывания, обработки, передачи и хранения;

сокращением времени на передачу и обработку информации (вплоть до информационного обмена в масштабе времени близкому к реальному), обусловленного необходимостью сокращения циклов управления для принятия упреждающих решений при повышении быстротечности вооруженных конфликтов;

повышением роли высокоманевренных действий войск, предъявляющих дополнительные требования к мобильности объектов и субъектов управления, а, следовательно, и к системе связи и ее элементам, вынуждая обеспечивать связь в движении;

широким использованием должностными лицами пунктов управления автоматизированных систем управления и подсистем поддержки принятия решения обуславливающих необходимость конвергенции услуг электросвязи (речи, данных, мультимедиа);

возрастанием роли информационного противоборства в современных конфликтах, диктующего необходимость заблаговременного планирования и учета организационно-технических мероприятий по повышению показателей скрытности (разведзащищенности) системы связи и ее элементов от разведки противника и живучести при последующем поражении (подавлении).

Развитие вооружения, военной и специальной техники на базе передовых достижений науки и техники наметило тенденции трансформации вооруженной борьбы любого масштаба в вооруженно-информационное противоборство. Путем избирательного целенаправленного деструктивного воздействия на объекты информационной инфраструктуры, субъект воздействия получает возможность безраздельно руководить ходом военных действий, нанося невосполнимые потери противоборствующей стороне. В этой связи, превосходство в информационной сфере стало одним из определяющих условий в достижении успеха в операциях, а информационное противоборство – решающим оперативным фактором, способным напрямую влиять на военно-политические и военно-технические аспекты вооруженной борьбы.

Естественным следствием изменений в характере вооруженной борьбы является зарождение ее новых форм, например, таких как информационно-ударная операция, которая обладает высокой эффективностью и способствует завоеванию инициативы и превосходства в информационной сфере (управление войсками и оружием, рефлексивное управление противником и др.) [6].

В технической сфере при проведении информационно-ударной операции традиционными способами противоборства являются [7, 8]:

радиоэлектронная борьба (РЭБ) как совокупность согласованных мероприятий и действий по радиоэлектронному поражению радиоэлектронных/информационно-технических объектов противника, радиоэлектронной защите своих радиоэлектронных/информационно-технических объектов, противодействию техническим средствам разведки противника, а также по радиоэлектронно-информационному обеспечению [9];

информационно-техническое воздействие на информационно-управляющие системы, определяемое как действия с применением аппаратно-программных средств, направленные на использование, искажение, подмену или уничтожение информации,

содержащейся в базах данных компьютеров и информационных сетей, а также на снижение эффективности функционирования либо вывод из строя самих компьютеров и компьютерных сетей [10];

физическое разрушение и уничтожению объектов информационной инфраструктуры, рассматриваемое в качестве проводимых в ходе информационной операции действия по применению средств огневого поражения и физического уничтожения с целью вывода из строя ключевых элементов системы управления и связи противника [10].

Проведенный анализ возможностей противника по нанесению дестабилизирующих воздействий показал, что вопросы обеспечения функциональной целостности и устойчивости напрямую влияют на эффективность функционирования ПУС СН. Среди прочих, в качестве основных (существенных) дестабилизирующих факторов определены следующие:

физическое воздействие на узловое оборудование и линии связи поражающих факторов высокоточных средств поражения в обычном снаряжении;

воздействие на радиоэлектронную аппаратуру мощным электромагнитным излучением средств функционального поражения, основанных на новых физических принципах;

снижение эффективности применения радиоэлектронных средств путем воздействия на их приемные устройства радиоэлектронными помехами (радиоэлектронное подавление);

кибервоздействие на телекоммуникационное оборудование в виде сетевых атак.

На техническом уровне элементы ПУС СН (аппаратные, станции связи) представляют собой совокупность большого числа, последовательно включённого разнотипного, требующего дополнительного согласования между собой, оборудования, что обуславливает их повышенную чувствительность к надежностным характеристикам. Кроме того, необоснованно внедряются в состав аппаратных (станций) связи технические средства, гражданского назначения (в том числе зарубежного производства), не обладающие достаточными показателями стойкости к прогнозируемым воздействиям. Это неминуемо приводит к снижению устойчивости оборудования и, как следствие, к снижению качества предоставляемых абонентам услуг, а в экстремальных условиях – к частичной и даже полной потере связи.

К числу внутренних дестабилизирующих факторов могут быть отнесены:

технические отказы из-за недостаточной надежности, используемого в военных системах управления и связи оборудования;

невысокой стойкости оборудования к внешним воздействиям;

умышленные (неумышленные) действия обслуживающего персонала.

Стремительное развитие передовых инфотелекоммуникационных технологий и повсеместное внедрение их во все сферы жизнедеятельности позволило вывести процесс управления на качественно новый уровень, приблизив момент интеграции системы связи специального назначения с высокотехнологичной сетью электросвязи общего пользования единой сети электросвязи (СЭОП ЕСЭ). Вместе с тем, использование современных технологий привело к увеличению разведывательной доступности элементов системы связи (узлов связи) для технических средств разведки противника, позволяя определить действия сил с точностью до элементов замысла, решения, плана по их составу, временной, пространственной и информационной структуре.

Вывод: анализ существенно возросших разведывательных возможностей противника, изменений в характере протекания современных вооруженных противоборств, особенностей функционирования узла связи в условиях прогнозируемых дестабилизирующих факторов, а также изменившихся в этой связи требований, предъявляемых к ПУС СН, позволяет заключить, что главенствующая роль принадлежит обеспечению его устойчивого функционирования, мобильности и скрытности, объединяемых интегральным свойством ФЦ. Это позволяет очертить круг исходных данных для разработки подхода к оценке его ФЦ.

Список литературы

1. Усиков А.В. Военное искусство в локальных войнах и вооруженных конфликтах: вторая половина XX - начало XXI века / [Усиков А.В. и др.]; под общ. ред. А.С. Рукшина; М-во обороны Российской Федерации, Ин-т военной истории. М.: Военное изд-во, 2009. 764 с.

2. Рунов В., Радионов С. Характерные черты современной операции (По опыту локальных войн конца XX - начала XXI вв.) // Армейский сборник. 2013. №12. С. 59-60.

3. Саидов Ф. Развертывание МНС в Ираке // Зарубежное военное обозрение. 2003. № 3. С. 19.

4. Гареев М.А. Уроки и выводы из войны в Ираке // Военная Мысль. 2003. № 8. С. 68.

5. Владимиров А.И. Основы общей теории войны: монография в 2 ч. Ч. 1. Основы теории войны. М.: Московский финансово-промышленный университет «Синергия», 2013. 831 с.

6. Анненков В.К., Баранов С.Н., Моисеев В.Ф., Хархалуп С.С. Сетецентризм: геополитические и военно-политические аспекты современности; под общ. ред. проф. Анненкова В.И. М.: РУСАВИА, 2013. 496 с.

7. Остапенко О.Н., Баушев С.В., Морозов И.В. Информационно-космическое обеспечение группировок войск (сил) ВС РФ: учебно-научное издание. СПб.: Любавич, 2012. 368 с.

8. Макаренко С.И., Чукляев И.И. Терминологический базис в области информационного противоборства // Вопросы кибербезопасности. 2014. №1 (2). С. 13 - 21.

9. Макаренко С.И. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетецентрических войнах начала XXI века Монография. СПб.: Наукоемкие технологии, 2017. 546 с.

10. ГОСТ РВ 0158-002–2008. Борьба радиоэлектронная. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2009. 12 с.

11. Жуков В. Взгляды военного руководства США на ведение информационной войны // Зарубежное военное обозрение. 2001. № 1. С. 6.

Милашевский Алексей Викторович, адъюнкт, a.milashevskij@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Мякотин Александр Викторович, д-р техн. наук, профессор, aleksandrmyakotin @gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Привалов Андрей Андреевич, д-р воен. наук, профессор, aprivalov@inbox.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного,

Чеботарев Владимир Иванович, сотрудник, доцент, vlad.chebotarev@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

FACTORS AFFECTING THE FUNCTIONAL INTEGRITY AND STABILITY OF THE FUNCTIONING OF A SPECIAL PURPOSE MOBILE COMMUNICATION CENTER

A.V. Milashevsky, V.A. Myakotin, A.A. Privalov, V.I. Chebotarev

The article discusses in detail the main factors affecting the functional integrity and stability of the functioning of a special-purpose mobile communication center, which allow to outline the range of initial data for developing an approach to assessing its functional integrity.

Key words: communication center, functional stability, functional integrity, secrecy, mobility, intelligence protection, reliability, armed conflict, information confrontation, information space, information-strike operation, electronic warfare, information and technical impact.

Milashevsky Alexey Viktorovich, postgraduate, a.milashevskij@gmail.com, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of communications named after Marshal Of The Soviet Union S.M. Budyonny,

Myakotin Alexander Viktorovich, doctor of technical sciences, professor, aleksandrmyakotin@gmail.com, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of communications. Marshal Of The Soviet Union S.M. Budyonny,

Privalov Andrey Andreevich, doctor of military sciences, professor, aprivalov@inbox.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of communications. Marshal Of The Soviet Union S.M. Budyonny,

Chebotarev Vladimir Ivanovich, employee, docent, vlad.chebotarev@gmail.com, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of communications. Marshal Of The Soviet Union S.M. Budyonny

УДК 004.94; 69

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ANSYS ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗДАНИЙ

А.Р. Газаров

Анализируются возможности ПО ANSYS и имеющиеся у него инструментария для решения задач, связанных с аэродинамикой объектов, в частности зданий, с целью дальнейшего применения полученных данных при составлении проектной документации, создание которой является весьма трудоемким и сложным процессом, учитывающим множество различных факторов.

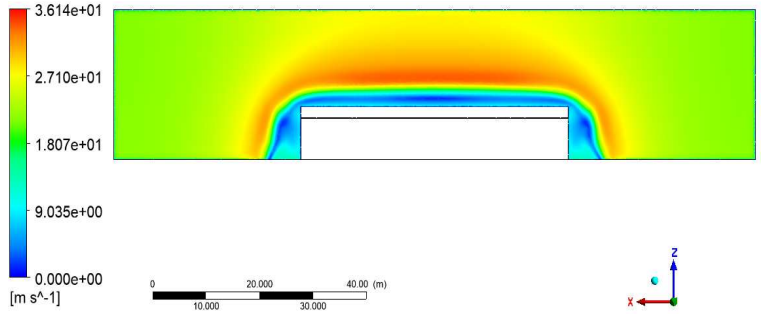
Ключевые слова: моделирование, здание, программный комплекс, задача, аэродинамика.

Современные программные комплексы позволяют оценить значительное количество параметров, например, аэродинамика автомобилей, сейсмическую устойчивость зданий, химические реакции между реагентами, силу электромагнитного воздействия и ее влияние на окружающие объекты [1 - 3]. В том числе одним из вариантов применения МКЭ является изучение давлений и сил, создаваемых ветром на объекты гражданского строительства.

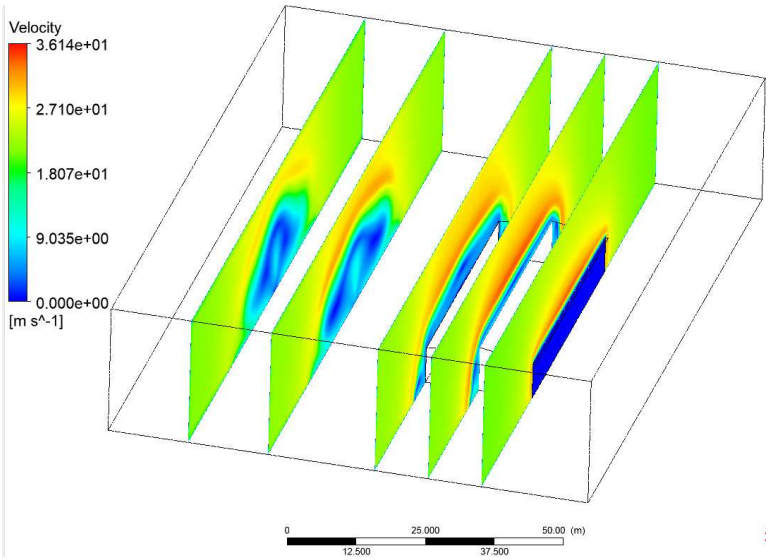
Информационные технологии, как и другие сферы человеческой мысли не стоят на месте и предлагают все больше способов решения проблем, в том числе которые связаны и с выявлением аэродинамических характеристик зданий, необходимых для архитектурных и строительных проектов [4, 5].

Процесс выявления аэродинамических характеристик представляет собой компьютерный расчет, а именно последовательное трехмерное моделирование потока воздуха, в котором границы являются стенками здания или среды, после чего полученная модель разбивается на связанные геометрические фигуры (конечные элементы), затем задаются условия протекания процесса.

В качестве примера будет проведено исследование аэродинамики сооружения складского типа, высотой 7 метров и шириной 50 м. При этом были выявлены скорости движения воздуха (рис. 1 и 2) и давления на почву и стенки зданий (рис. 3).



а



б

Рис. 1. Схема скоростей: а – в плоскости здания, б – в различных плоскостях

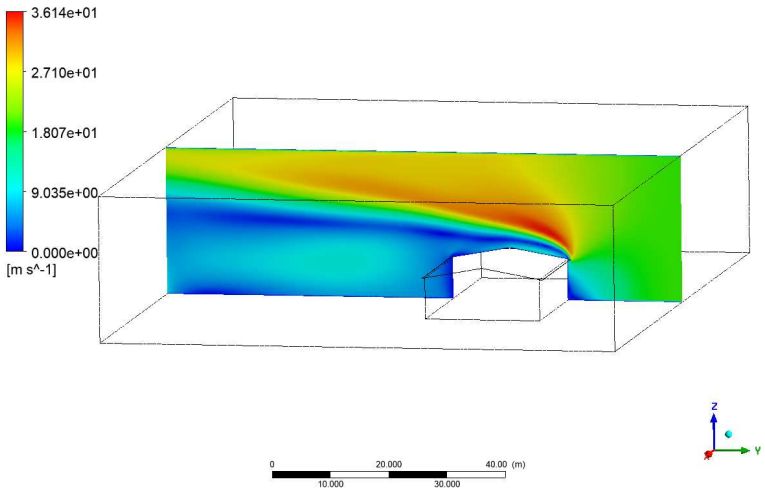


Рис. 2. Скорость ветра в сечении

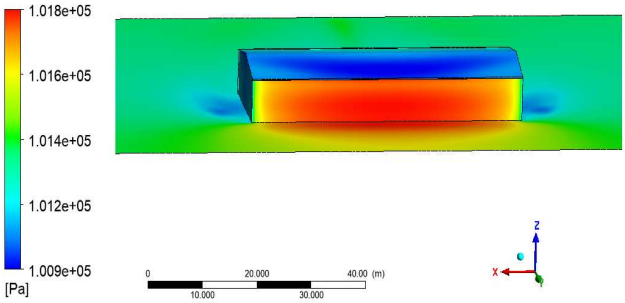


Рис. 3. Распределение давлений, оказывающих действие на само здание и на почву вокруг

Исследование аэродинамических характеристик зданий проводится в различных сечениях, что позволяет комплексно оценить, как обтекание здания воздушными массами, так и влияние здания на изменение скорости и направления ветра. При этом моделирования можно проводить с применением более тонких настроек, таких как изменяющаяся скорость движения воздуха на разной высоте относительно земли или изучать влияние ветра с посторонними включениями, такими как песок, пыль.

Выводы:

1. Стремительное развитие информационных технологий и программного обеспечения позволяет существенно упростить жизнь ученым и инженерам.

2. Современные программы позволяют анализировать аэродинамические параметры сооружений, при этом, не только можно посмотреть аэродинамику в таких программах, но и устойчивость к землетрясениям, несущую способность стен зданий, влияние солнечных лучей на внешнюю поверхность крыши, охлаждение помещения с помощью кондиционера и множество других расчетов.

Список литературы

1. Lawson T. Building Aerodynamics. 1 изд. Icp, 2001. 301 с.

2. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. М.: Либроком, 2015. 272 с.

3. Алямовский А. SolidWorks/COSMOSWorks 2006/2007. Инженерный анализ методом конечных элементов. М.: Книга по Требованию, 2007. 784 с.

4. Гилев В.М., Шпак С.И. Программное обеспечение АСНИ ИТПМ. Системные программы объектового уровня // Автоматизация аэродинамического эксперимента. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1985. С. 23-31.

5. Горлин С.М., Слезингер И.И. Аэродинамические измерения. М.: Наука, 1964. 720 с.

Газаров Артур Робертович, студент, den-arti777@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

APPLICATION OF ANSYS SOFTWARE FOR IDENTIFYING THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF BUILDINGS

A.R. Gazarov

Analyzes the capabilities of the ANSYS software and its tools for solving problems related to the aerodynamics of objects, in particular buildings, with the aim of further using the obtained data in the preparation of design documentation, the creation of which is a very laborious and complex process that takes into account many different factors.

Key words: modeling, building, software package, task, aerodynamics.

Gazarov Artur Robertovich, student, den-arti777@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.056.5

КИБЕРАТАКИ НА ИНФОРМАЦИОННЫЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

А.А. Абидарова

В статье анализируются угрозы информационным и автоматизированным системам. Приводятся практические рекомендации по снижению уровня угрозы.

Ключевые слова: кибератаки, системы, компьютерные, информационные, автоматизированные, вирусы.

Интернет, как и всякая питательная среда, полон всевозможных вирусов [1]. С вирусами так или иначе сталкивался практически каждый пользователь компьютера, помимо этого вирусы могут нанести серьезный вред автоматизированным системам, приостановив их работу, нанеся материальный вред заводу, корпорации или небольшому предприятию. Причём вирусы попадают в компьютер не только из Интернета, но с любого типа носителей [2 - 4].

Компьютерный вирус (рис. 1) – это обычная программа, которая, как правило, выполняет действия, запрограммированные её создателем. Эти действия направлены против систем, и производятся незаметно, проявляются неожиданно для ничего не подозревающего пользователя, и, естественно, эти действия им никак не санкционированы.

Попадание вируса на компьютер происходит достаточно просто – через Интернет или локальную сеть, через безобидную на первый взгляд почтовую рассылку, с помощью файлообменных систем или съёмных носителей информации.

Технически, в данном вопросе, всё очень просто – ничего не подозревая, например, кликнув на зараженный файл, он активируется, и копия вируса незаметно внедряется в ваш компьютер. При дальнейшей работе самых разных программ на компьютере и в системе, вирус внедряется во все его ресурсы, и, если пользователь вовремя не примет соответствующие меры по выявлению и удалению вредоносных файлов, то в лучшем случае вся важная информация перекочует к заинтересованному лицу, а в худшем - вас ожидает полная потеря всех данных и даже поломка носителей информации.

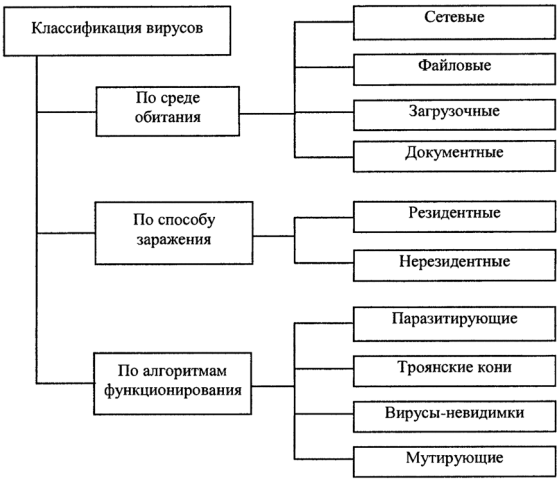


Рис. 1. Классификация компьютерных вирусов

Существует ряд правил и рекомендаций, позволяющих снизить риск заражения информационной и компьютерной системы:

1) Во-первых, не следует открывать почту, пришедшую на почтовый ящик от любых незнакомых адресатов.

Также может насторожить откровенно непонятный заголовок, и даже если заголовок понятного, но явно рекламного направления. Часто могут приходить письма-ответы с заголовками, содержащими «Re:». В данном случае следует избегать скачивания файлов, которые в такие письма вложены – очень большая вероятность того, что в одном из этих файлов скрывается вирус.

2) Нужно устанавливать на компьютер только лицензионные антивирусные программы, настраивать firewall (сетевой экран).

3) Необходимо регулярно обновлять программное обеспечение компьютера, в том числе и операционную систему. Данная мера требуется для уменьшения количества уязвимостей и путей распространения вируса.

4) Использование только лицензионного программного обеспечения, во избежание заражения системы вирусом, расположенным в нелицензионном установщике.

Еще более тревожным является то же исследование, которое показывает, что 60% пострадавших малых предприятий обанкротились через 6 месяцев после кибер-атаки. Чтобы избежать этой потенциальной опасности, ниже приведены некоторые практические советы [1,2,3].

Проводить регулярные проверки безопасности.

С увеличением числа опор, соединением пользователей, умножением решений для онлайн-хранилищ все больше и больше становятся входными дверями в IS компании. Поэтому существует больше рисков уязвимостей, которые связаны либо с инфра-ИТ (например, троянским конем), либо с людьми (кража личных данных с помощью телефонных звонков, смс или электронной почты). Отсюда необходимость регулярных проверок безопасности для выявления потенциальных нарушений безопасности.

Аудит безопасности в первую очередь предназначен, чтобы сделать точную оценку способности ИФ противостоять кибер-атакам, выявление уязвимостей и реализации корректирующих действий. Определение сильных и слабых сторон ИТ-системы обеспечивает всестороннее и реалистичное представление об устойчивости инфраструктуры для противостояния кибер-атакам. Существует два вида аудита безопасности:

Внешний аудит безопасности. Он используется для выявления потенциальной уязвимости корпоративной сети перед лицом атак извне. Таким образом, этот тип аудита позволит определить элементы, в которые должны быть внесены улучшения, чтобы максимизировать уровень безопасности ИС. Чтобы провести внешний аудит безопасности, необходимо сначала просмотреть информацию о компании, свободно доступную в Интернете, которая может представлять угрозу безопасности. Затем необходимо выполнить тесты на проникновение, чтобы идентифицировать и атаковать все точки входа целевого IS, а затем проверить безопасность приложения, проанализировав код приложений, используемых для обнаружения ошибок проектирования, которые могут вызвать нарушение безопасности.

Внутренний аудит безопасности. Целью внутреннего аудита безопасности является оценка рисков информационной системы в процессе эксплуатации. По сути, речь идет о защите данных от трех типов угроз, таких как раскрытие, изменение и потеря. Для этого необходимо пройти несколько этапов, в частности этап приобретения, состоящий из группировки всех технических документов по архитектуре ИС и публикаций, относящихся к конкретному сектору компании.

Существует также фаза обслуживания, чтобы понять процедуры, ранее оформленные в рамках политики безопасности ИТ. Наконец, фактическая фаза аудита для определения способности ИБ эффективно реагировать на риски, возникающие в результате различных составляющих его элементов. Цель состоит в том, чтобы выделить значительные аномалии или недостатки.

Внутренне повысить осведомленность сотрудников о проблеме безопасности данных.

Профилактика лучше лечения, чтобы избежать кражи данных посредством сомнительного клика или электронного письма. Все сотрудники должны знать меры безопасности при установке нового программного обеспечения или передовые методы управления паролями, обработки личной информации, а также вложений.

Поэтому необходимо обучать сотрудников, которые часто считаются воротами для кибер-преступников. Это осознание может быть обучением, состоящим из нескольких часов занятий по различным типам кибер-атак и различным способам ежедневной защиты от них.

Недостатки в компьютерной системе не ограничиваются самим оборудованием. Сотрудники, а также поставщики или поставщики услуг, которые имеют доступ к сети компании, также могут представлять риски.

Кибер-атаки представляют собой реальную угрозу, независимо от размера компании. Чтобы не стать жертвой, необходимо строго соблюдать правила безопасности.

Также все чаще и чаще приходится обращаться к внешнему провайдеру услуг с просьбой оценить уровень кибер-безопасности компании, воспользоваться индивидуальными рекомендациями и соблюдать их на всех этапах.

Список литературы

1. Абалмазов Э.И. Методы и инженерно-технические средства противодействия информационным угрозам: учебник для вузов. М.: Гротек, 2011. 248 с.

2. Грибунин В.Г., Чудовский В.В. Комплексная система защиты информации на предприятии : учебное пособие для вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 416 с.

3. Петраков А.В. Основы практической защиты информации: учебное пособие для вузов. М.: Радио и связь, 2010. 203 с.

4. Смирнова А.Н. Защита информации: учебник для вузов. М.: Смарт, 2012. 176 с.

5. Маглинец Ю.А. Анализ требований к автоматизированным информационным системам. М.: Интернет-университет информационных технологий, Бином. Лаборатория знаний, 2008. 200 с.

5. Смирнова А.Н. Защита информации: учебник для вузов. М.: Смарт, 2012. 176 с.

Абидарова Александра Алексеевна, студент, sc-afadr@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

CYBER ATTACKS ON INFORMATION AND AUTOMATED SYSTEMS AND COMPLEXES

A.A. Abidarova

The article analyzes threats to information and automated systems. Provides practical recommendations for reducing the threat level.

Key words: cyberattacks, systems, computer, informational, automated, viruses.

Abidarova Alexandra Alekseevna, student, sc-afadr@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.7; 693.8

АНАЛИЗ ВОПРОСОВ ПРИМЕНЕНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Р.А. Колосов

Описываются основные сферы применения металлических конструкций, их достоинства и недостатки. Приводится технологический процесс изготовления металлоконструкций.

Ключевые слова: металлоконструкции, изготовление, строительство, балки, фермы.

Применение металлоконструкций при строительстве различных объектов – уже далеко не новый технологический процесс. Ведь еще 50 лет назад в России эту технологию активно применяли при строительстве зданий. Тогда нужно было максимально быстро и сравнительно дешево построить и восстановить жилые и хозяйственные постройки [1-2].

Но и сегодня металлоконструкции все еще широко применяются в самых разных отраслях. Почти везде при возведении современных сооружений (рис. 1) используются каркасы, листы из металла и прочные балки.

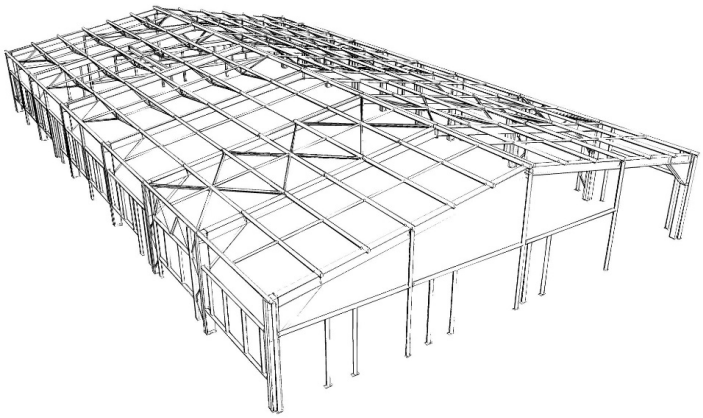


Рис. 1. Пример каркаса сооружения из металлических конструкций

Из-за роста спроса на металлические конструкции (рис. 2) необходимо наращивать их производство. Поэтому приходится не только модернизировать существующие заводы, производящие изделия, но и строить новые.



Рис. 2. Классификация конструкционных форм металлических конструкций

Само изготовление металлоконструкции идет в несколько последовательных технологических этапов (рис. 3) [3-4]. Только точное соблюдение их позволит в итоге получить пригодную продукцию, способную отвечать всем требованиям.

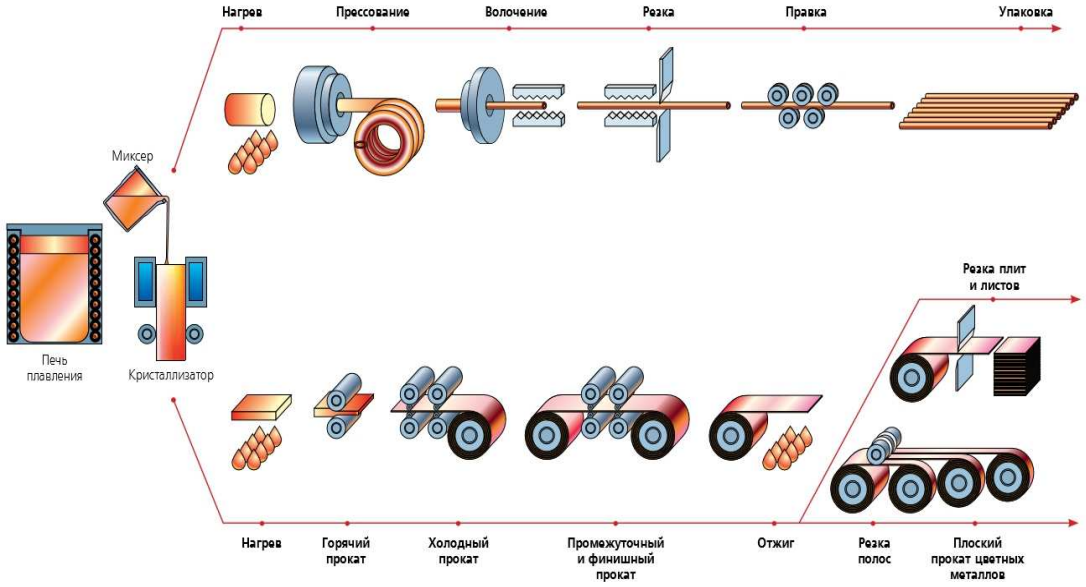


Рис. 3. Технология производства

Металлические конструкции – основа нынешнего строительного процесса. Поэтому изделия остаются до сих пор очень популярными и востребованными в строительстве.

Потребность в сфере строительства не только сохраняется, но и постоянно растет. Этому способствует ряд преимуществ металлоконструкций:

1. Несложный процесс изготовления и, соответственно, возможность производить целые партии конструкций в сжатые сроки.

2. Конструкция обладает высокой прочностью. Готовое изделие надежно и долговечно. По многим качествам они превосходят изделия из цемента и, тем более, древесины.

3. Скорость монтажа. Объекты из металлоконструкций возводятся в короткие сроки.

4. Изделия устойчивы к воздействию влаги, да и в целом к неблагоприятным природным условиям.

5. Возможность изготавливать неограниченное число похожих друг на друга конструкций.

6. Оптимизация расходов при строительстве зданий. Это один из ключевых факторов рентабельности, ведь возведение объекта из металлических конструкций обходится дешевле.

7. Изделия из металла не горят, не боятся резких перепадов температуры. Сама по себе материал экологичен. Даже если материал отработан или имеет дефекты, то конструкцию можно использовать повторно.

Недостатки у металлоконструкций есть. Например, они не такие долговечные, как железобетон, так как металл все же подвержен коррозии.

Следует сказать, что появляются все новые технологии производства конструкций, позволяющие частично или даже полностью нивелировать этот недостаток.

Металлоконструкции служат по факту меньше времени, чем железобетонные. Однако на деле картина такова, что сооружения, построенные из металлических конструкций еще в середине прошлого века, все еще стоят до сих пор и почти ничуть не пострадали.

Базовая функция изделий заключается в возведении каркаса строящегося объекта, что обеспечит прочность и, само собой, безопасность здания.

Конструкции используют как в строительстве быстровозводимых зданий, так и при сооружении промышленных объектов.

Ход монтажа зависит по большей части от высоты будущей постройки, особенностей ее конструкции и других моментов. Работа по сборке конструкций из металла делится на этапы:

1. Сборка малых элементов. Прямо на стройплощадке идет монтаж небольших элементов.

2. Сборка больших составных частей, полностью готовых к укладке. Как правило, такой этап проходит быстрее, если сравнивать с монтажом небольших элементов. Сборка крупных частей применяется при возведении стандартных сооружений.

3. Укладка блоков. Отдельно собираются крупные секции, а потом устанавливаются уже на фундамент будущего строения.

4. Монтаж блоков. Данный тип сборки обычно используется для возведения радиовышек и опор линий электросетей.

Металлоконструкции, изготавливаемые на заводах, имеют массу вариантов применения. Но специалисты постоянно разрабатывают новые формы, чтобы повысить прочность конструкций и упросить монтаж изделий, снизив этим затраты на строительство.

Основными видами металлоконструкций являются каркасы, металлические блоки, балки, колоны, армирующие сетки, листы из стали и т. д.

Изделия обязательно красятся в несколько слоев и обрабатываются полимерными составами на заводах для защиты от воздействия атмосферных осадков, солнечных лучей.

Таким образом, применение металлических конструкций в современном мире не ограничивается лишь строительством, и такого рода технологии позволяют с наименьшими затратами и короткие сроки возводить здания и сооружения.

Список литературы

1. Беленя Е.И. Металлические конструкции. М.: ЁЁ Медиа, 2015. 783 с.

2. Копытов М.М. Металлические конструкции каркасных зданий. Учебное пособие. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2016. 400 с.

3. Кропивницкий Н.Н. Технология металлов. М.: Лениздат, 1973. 250 с.

4. Беляев А.И. Металлургия легких металов. Учебник. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 2013. 404 с.

Колосов Руслан Андреевич, студент, den-arti777@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYSIS OF ISSUES OF THE APPLICATION AND MANUFACTURE OF METAL STRUCTURES

R.A. Kolosov

The scope of application of metal structures, their advantages and disadvantages are described. The technological process of manufacturing metal structures is presented.

Key words: metal structures, manufacturing, construction, beams, trusses.

Kolosov Ruslan Andreevich, student, den-arti777@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.94; 69

МЕТОД АНАЛИЗА АЭРОДИНАМИКИ ЗДАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА БАЗЕ МКЭ

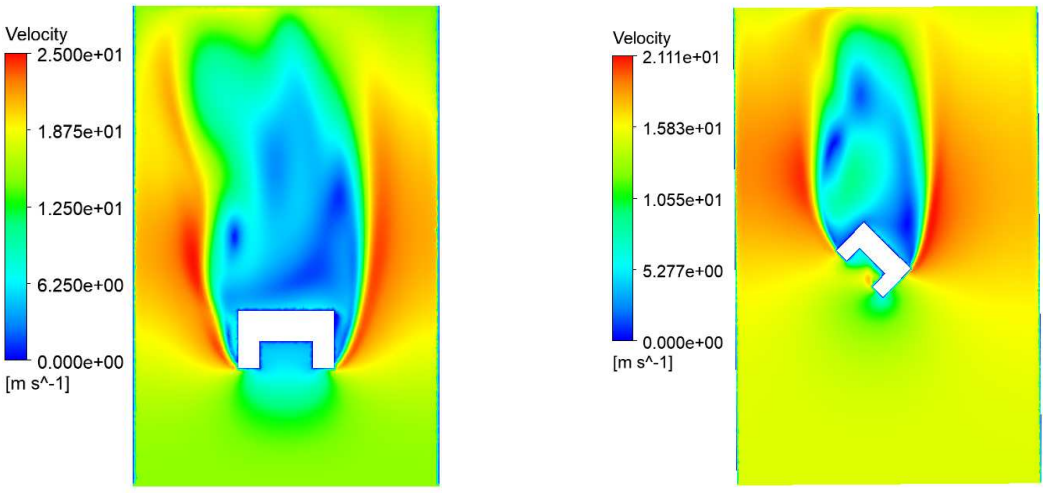
К.А. Калинин

Проводится компьютерное моделирование обтекания жилого здания воздушными массами. Приводится аналитическое сравнение аэродинамических характеристик здания в различных условиях.

Ключевые слова: математический анализ, аэродинамика, компьютерное моделирование, программный комплекс, метод конечных элементов.

Исследования, основанные на компьютерных и математических моделированиях, является одним из основополагающих при проектировании, сравнительном анализе, изобретательской деятельности. В качестве основного метода построения математической модели в большинстве программных комплексов лежит метод конечных элементов. Данный метод подходит для решения широкого круга задач связанных с перераспределением жидкостей и газов, нагружении различных конструкций, анализе электромагнитных полей, акустических воздействий и вибраций [1 - 3]. Так, например, ПО Ansys зачастую используется для оценки аэродинамики зданий [4, 5].

В качестве примера, в работе рассматривается П-образное здание высотой 45 м и шириной 50 м. При этом рассмотрим вариант, когда здание обращено в сторону ветра двумя сторонами, как показано на рис. 1.



а ***б***

Рис. 1. Скоростные показатели

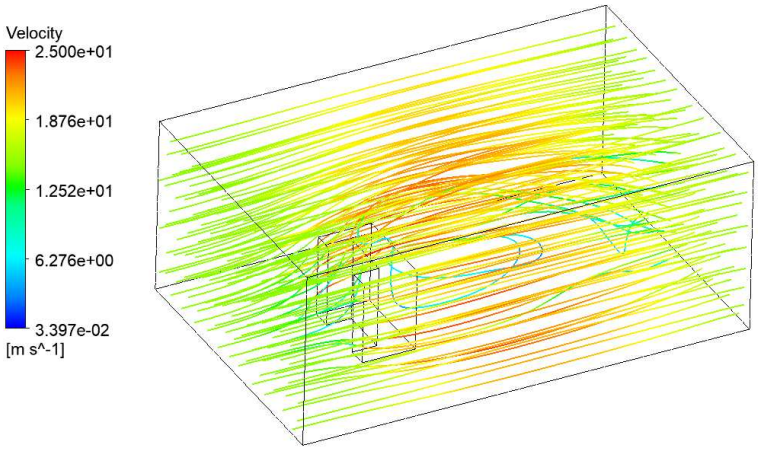
Начальная скорость ветра, в исследуемой области составляет 15 м/с, при этом в зависимости от высоты над уровнем земли скорость не меняется, а остается постоянной. Модель движения воздуха является турбулентной *k-e*. Физические свойства воздуха взяты при температуре 22 градуса Цельсия.

Таким образом рассмотрим, как обтекают воздушные потоки здание. При этом рассматривается 2 варианта:

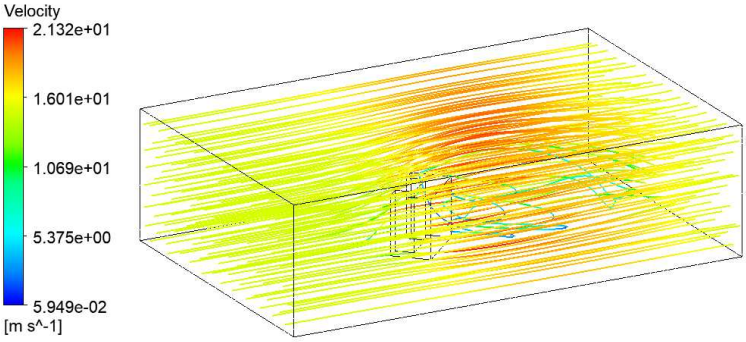
1. Ветер направлен на лицевую сторону здания (рис. 1, а, рис. 2, а);

2. Движущиеся воздушные массы имеют направление под углом 45° относительно сооружения.

На рис. 2 приведены линии, характеризующие движение воздуха в трехмерной модели.



а

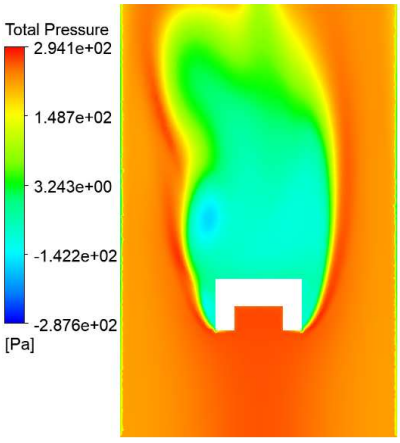


б

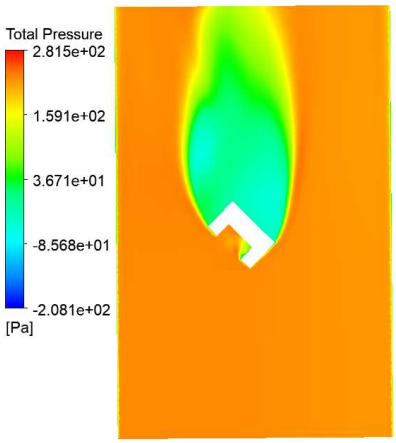
Рис. 2. Скоростные показатели

Как видно из рис. 1 и 2 в области, находящейся за зданием наблюдается значительное снижение скорости ветра, т.е. здание является препятствием для движущихся воздушных масс. К тому же на границах со зданием возникают завихрения. Скорость движения ветра за сооружением снижается в некоторых областях до 0. При этом по обе стороны обтекания воздухом здания увеличивается скорость движения воздушных масс до 25 и 21 м/с соответственно для случаев, когда ветер направлен на лицевую сторону здания и под углом к нему.

Помимо скорости ветра, важным параметром является общее давление (рис. 3).



а



б

Рис. 3. Общее давление

В первом случае (рис. 3, а) общее давление возрастает до 290 Па, а во втором случае (рис. 3, б) до 280 Па.

Подобные программы и программные комплексы, наподобие Ansys способствуют не только значительному сокращению временных и трудозатрат на различные исследования, но и благодаря данному ПО снижаются финансовые издержки на проектирование, в данном случае зданий.

Целью данного исследования является анализ возможностей программы и анализ того, как воздушные массы обтекают здание с различных сторон. В данном случае, значительного влияния расположения сооружения относительно к направлению ветра не было выявлено.

Список литературы

1. Белова И.М. Компьютерное моделирование. М.: МГИУ, 2008. 81 с.

2. Никитин А.В. Компьютерное моделирование физических процессов. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2011. 679 с.

3. Алгазинов Э.К., Сирота А.А. Анализ и компьютерное моделирование информационных процессов и систем; под общ. ред. проф. д.т.н. Э.К. Алгазинов. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2009. 416 с.

4. Семенов А.С. Использование разрушающих и неразрушающих методов контроля физикомеханических характеристик материала строительных конструкций // Строительные материалы. 2010. № 12. С. 86-87.

5. Крыгина А.М., Севрюкова Л.В. Современные подходы к реализации сложных проектов российских строительных компаний на основе конкурентоспособности стратегии: мемуары // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 8. С. 24-27.

Калинин Кирилл Алексеевич, студент, den-arti777@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

METHOD FOR ANALYSIS OF AERODYNAMICS OF BUILDINGS USING SOFTWARE COMPLEXES BASED ON FEM

K.A. Kalinin

Computer modeling of the air flow around a residential building is carried out. Such a comparison of the aerodynamic characteristics of the building and analytical characteristics in different conditions is given.

Key words: mathematical analysis, aerodynamics, computer modeling, software package, finite element method.

Kalinin Kirill Alekseevich, student, den-arti777@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.056.55

ОБЩИЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВРЕДОНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Д.В. Афанасьева

Анализируются существующие варианты вредоносного программного обеспечения, вопросы их эволюции, влияние на мировую экономику.

Ключевые слова: программное обеспечение, вирусы, защита, вредоносное программное обеспечение.

Традиционные вирусы достаточно просты. Их целью является нанести вред пользователю или компании, украсть деньги, данные [1,2]. Существует огромное число вирус, которые можно классифицировать по среде обитания (рис. 1), а также по опасности (рис. 2).



Рис. 1. Классификация вирусов по среде обитания [3]

Но в последние годы появилась новая угроза - компьютерный вирус flame [4]. Вирус активен в основном в странах Ближнего Востока, однако его следы находятся и на территории иных государств. Этот вирус является одним из самых сложных вирусов за всю историю [4]. Стало известно о вирусе в 2010 году, когда он был выявлен Лабораторией Касперского – одним из ведущих производителей антивирусных программ. Известно, что вирус относится к семейству троянов, но способы, какими он заражает компьютеры, до конца не выяснены.

Попадая в систему, flame активирует 20 модулей, для каждого из которых предусмотрен собственный инструмент. Инструменты вируса позволяют ему отслеживать изображение на экране, ждать запуска нужных программ, например, программ чата, и сохранять переписку посредством скриншотов. Существует инструмент, позволяющий запускать микрофон на компьютере и записывать разговоры. Также, вирус отслеживает трафик в интернете и запоминает всю записываемую пользователем информацию. После чего, все добытые данные отсылаются на серверы авторов вируса.

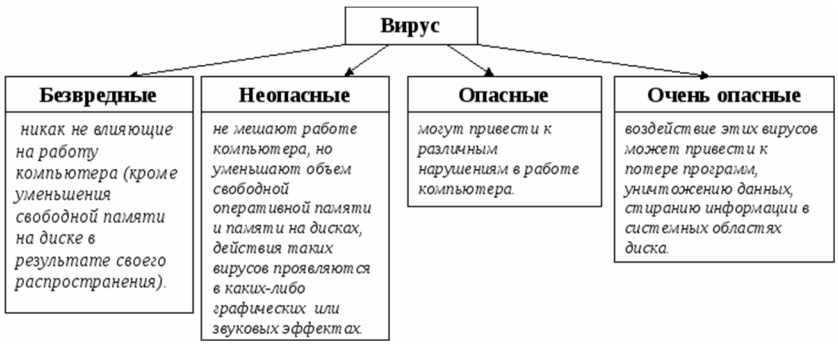


Рис. 2. Классификация вирусов по степени опасности

Исследователи отмечают, что вирус не создан для воровства денег со счетов пользователей и сравнивают его с работой другого вируса «Stuxnet», поразившего в 2010 году ядерные станции Ирана.

Вирус flame обладает полным набором инструментов для шпионажа в любой индустрии, как в энергетике, так и в военном комплексе, или за частной жизнью обычных граждан. Его интересует все: электронная почта, документы, обсуждение актуальных тем, личные сообщения пользователей.

Доподлинно неизвестно кем и для чего был создан компьютерный вирус flame, но он является новым витком в технологии вирусов, обладая невиданной ранее сложностью и функциональностью.

Вирусы создаются с целью нарушения нормальной работы операционной системы или похищения конфиденциальной информации. Есть большая группа вирусов, рассылающих спам от лица зараженного компьютера, или вымогающих деньги с пострадавшего пользователя. Все они отличаются способом проникновения на компьютер, и удалить их тоже можно разными способами.

Количество вирусов каждый год растет (рис. 3), и почти каждый пользователь так или иначе сталкивался с необходимостью чистить операционную систему от вирусов. Лучше позаботиться заранее о защите компьютера и установить антивирус до заражения. Но если вирус уже попал, существуют способы удалить его самостоятельно и без потери данных с информационных носителей. Некоторые вирусы можно удалить достаточно просто вручную, другие потребуют установки специализированных программ и сканирования системы.

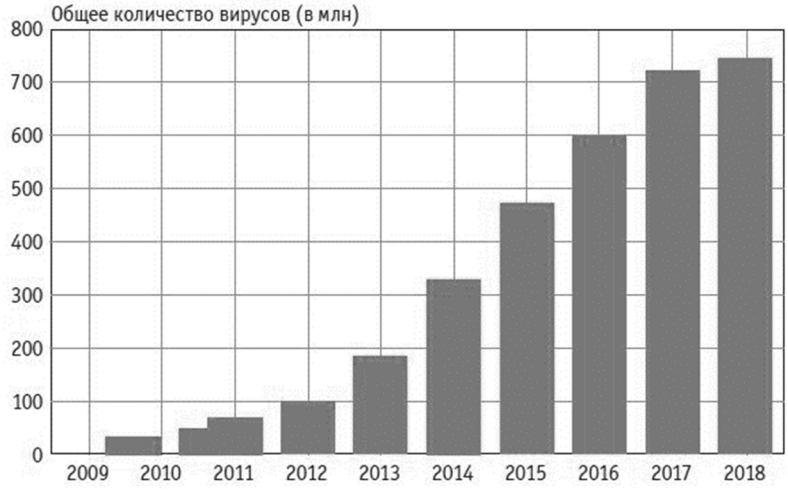


Рис. 3. Диаграмма роста числа вирусов

Если заражена флешка, то чаще всего, можно обнаружить на ней файл autorun.inf. Это и есть вирус. Чтобы почистить флешку, достаточно вручную скопировать с неё все важные файлы, после чего отформатировать флешку. Нельзя просто скопировать находящиеся на флешке папки с файлами, поскольку, в папках могут быть скрытые копии вируса. Чтобы их не сохранить вместе с полезными файлами, каждый файл надо выделять и копировать вручную. Если вирус попал на компьютер, он будет автоматически заражать все подключаемые к нему съемные диски, поэтому, требуется почистить компьютер с помощью любого антивируса.

Более серьезного подхода потребует другие вирусы, например, типа троянской программы. Бывают они разного типа. Одни незаметно похищают ценную информацию, другие передают контроль системы в руки третьих лиц, некоторые блокируют операционную систему и требуют перечислить деньги на счет злоумышленников, чтобы возобновить контроль, существуют также и вирусы целью которых является удаление определённых файлов.

Если цель троянской программы похищать информацию, то она не будет себя никак проявлять. Догадаться о присутствии в системе трояна возможно по увеличенному числу сбоев систем и приложений, потери производительности, росту трафика в сети Интернет.

Для удаления программы потребуется антивирус. Любой антивирус достаточно успешно справляется с вирусами такого типа. Куда сложнее дела обстоят с вирусами семейства winlock, блокирующими систему. Они не позволяют установить или запустить антивирус с зараженного компьютера, поэтому, потребуется непосредственное использование BIOS.

В итоге, компьютерные вирусы являются весьма сложными программами, зачастую наносящими существенный вред отдельным пользователям, компьютерным сетям, организациям. Данный программы следует незамедлительно удалять, использовать специальный софт для их обезвреживания, а также регулярно проводить мониторинг системы и обновлять ОС, драйвера, иные программы. Так риск заражения и нанесения существенного вреда будет минимальным.

Список литературы

1. Девянин П.Н. Анализ безопасности управления доступом и информационными потоками в компьютерных системах. М.: Радио и связь, 2013. 176 с.

2. Мельников Д.А. Информационная безопасность открытых систем: учебник. М.: Флинта, 2013. 448 с.

3. Чернопятов А. Наука, образование и практика: профессионально-общественная аккредитация, тьюторство, информационные технологии, информационная безопасность. М.: Русайнс, 2013. 144 с.

4. Flame’s crypto attack may have needed $200,000 worth of compute power // Ars Technica Addendum. [Электронный ресурс] URL: https://arstechnica.com/information-technology/2012/06/flame-crypto-attack-may-have-needed-massive-compute-power (дата обращения: 07.08.2020).

Афанасьева Дарья Владимировна, студентка, sc-afadr@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

GENERAL ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF MALWARE SOFTWARE

D.V. Afanasyeva

Existing variants of malicious software, issues of their evolution, impact on the world economy are analyzed.

Key words: software, viruses, protection, malicious software.

Afanasyeva Daria Vladimirovna, student, sc-afadr@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 623.4

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФРИКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ОПОРНО-ПОВОРОТНОЙ ПЛАТФОРМЫ ПРИ ВИЗУАЛЬНОМ СОПРОВОЖДЕНИИ ВЫСОКОДИНАМИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ, ДВИЖУЩИХСЯ ПО НАВЕСНЫМ ТРАЕКТОРИЯМ

В.Л. Баранов, О.И. Желтова, И.Б. Литус, Р.А. Тер-Данилов,
А.Е. Чванов, А.П. Чупахин

Решена задача определения управляющего крутящего момента силового привода оптической аппаратуры, осуществляющей визуальное сопровождение боеприпасов на траектории в вертикальной плоскости при проведении полигонных испытаний. Оценивается влияние интегрального динамического момента сил трения на контактной опорной поверхности на формирование управляющего момента.

Ключевые слова: полигонные испытания, визуальное сопровождение, опорно-поворотная платформа, контактное трение.

Анализируется кинематика и динамика процесса визуального сопровождения объекта, движущегося нестационарно по параболической траектории, осуществляемого электроприводом, вращающим видеокамеру в вертикальной плоскости (рис. 1).

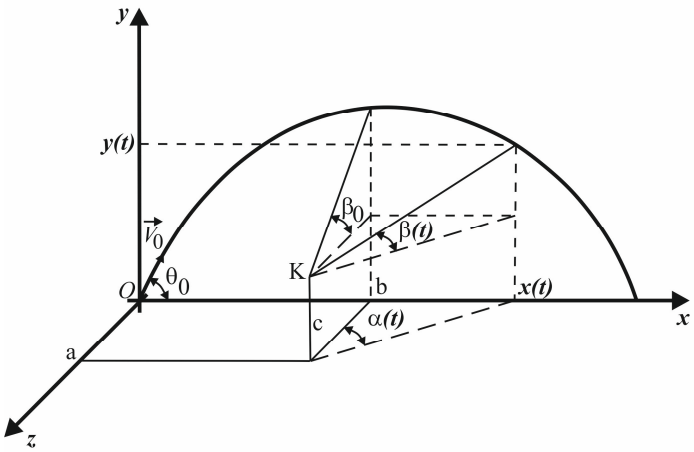


Рис. 1. Схема размещения сопровождающей аппаратуры

Необходимо оценить влияние моментно-силовых характеристик, возникающих на контактных поверхностях платформы видеокамеры и ее основания и имеющих фрикционную природу, на формирование потребного крутящего момента привода, реализующего визуальное сопровождение движущего объекта, кинематические характеристики которого заданы в рамках решаемой задачи на исследуемом участке траектории априори.

Электрический привод поворотной платформы и видеокамеры, в связи с инерционностью их суммарной массы, не может сообщить вращающейся части аппаратуры заданную априори и зависящую от скорости движения центра масс боеприпаса в начальной точке исследуемого участка траектории y_0 в соответствующий момент времени t_0 начальную угловую скорость ω_0 мгновенно, поэтому необходим предварительный разгон аппаратуры в течение некоторого промежутка времени $(t_0 - t_*)$. При этом на участке разгона угловое ускорение вращающейся части аппаратуры не должно превышать предельно допустимого значения $[\varepsilon]$, являющегося одной из ее важных технических характеристик [1].

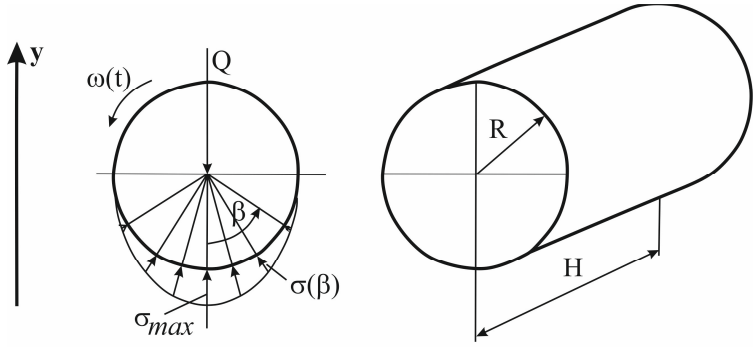


Рис. 2. Схема нагружения горизонтально вращающегося вала (оси) привода

Ранее было показано [8], что сформулированную выше задачу можно разделить на два этапа:

1) предварительный этап, на котором происходит разгон аппаратуры по законам $\omega_1(t)$, $\varepsilon_1(t)$, обеспечивающим техническую и эксплуатационную возможность выхода угловой скорости из нулевого значения в момент временt_*в расчетное начальное значение ω_0 в точке захвата объекта сопровождения z_0 в момент времени t_0;

2) основной этап, на котором происходит устойчивое визуальное сопровождение движущегося боеприпаса на исследуемом участке траектории и вращательное движение аппаратуры, строго регламентировано и описывается соответствующими функциями $\omega_2(t)$, $\varepsilon_2(t)$.

В рамках рассматриваемой задачи функции $\omega_1(t)$, $\varepsilon_1(t)$, $\omega_2(t)$, $\varepsilon_2(t)$ считаются известными априори из решения внешнебаллистической задачи в рамках параболической теории [1]. Записываем уравнение вращательного движения привода в вертикальной плоскости:

$$J_2 \frac{d\omega_\beta}{dt} = M_{BP}(t) - M_{TP}(t), \tag{1}$$

$$M_{BP}(t) = J_2 \frac{d\omega_\beta}{dt} + M_{TP}(t). \tag{2}$$

Осевой момент инерции J_2 вращающейся части аппаратуры относительно горизонтальной оси (величина данной массы принималась 1/3 от массы привода, вращающейся относительно вертикальной оси [8]).

В качестве промежуточной цели, необходимо найти: $M_{тр}(t)$, $\beta \in \left[0; \frac{\pi}{2}\right]$. В рассматриваемом случае нормальные контактные напряжения на нижней дуге, на которую опирается вал платформы при ее вращении, описывается косинусинусоидальным законом [1]:

$$\sigma(\beta) = \sigma_{max} \cdot \cos\beta. \tag{3}$$

Радиусы вала и дуги, на которую он опирается, будем считать одинаковыми (они очень близки в случаях, когда вал посажен на подшипник [2]).

С учетом (3) определим силу, с которой элементарный сектор вала опирается на соответствующую поверхность опоры, и ее проекцию на вертикальную плоскость:

$$dF(\beta) = \sigma(\beta)dS = \sigma_{max} \cdot \cos\beta \cdot Rd\beta \cdot H$$

$$dF_y(\beta) = dF(\beta) \cdot \cos\beta = \sigma_{max} \cdot \cos^2\beta \cdot H \cdot R \cdot d\beta = \sigma_{max} \cdot H \cdot R \cdot \cos^2\beta \cdot d\beta . \quad (4)$$

Уравнение относительности равновесия в проекции на ось OY:

$$Q = 2\int_0^{\pi/2} dF_y(\beta) = 2 \cdot \sigma_{max} \cdot H \cdot R \cdot \int_0^{\pi/2} \cos^2\beta \, d\beta ;$$

$$\sigma_{max} = \frac{Q}{2 \cdot H \cdot R \cdot \int_0^{\pi/2} \cos^2\beta d\beta} = \frac{2 \cdot Q}{H \cdot R \cdot \pi} ; \quad (5)$$

$$\sigma(\beta) = \frac{2Q}{H \cdot R \cdot \pi} \cdot \cos\beta . \quad (6)$$

Касательное контактное напряжение в точке, находящейся на окружности радиуса r в момент времени t, с учетом (6) определится так [8]:

$$\tau(\beta) = \sigma(\beta) \cdot f(t) = \sigma(\beta) \cdot f_0 \cdot \frac{1 + a_1 \cdot V(t)}{1 + a_2 \cdot V(t)} = \frac{2Q}{H \cdot R \cdot \pi} \cdot \cos\beta \cdot f_0 \cdot \frac{1 + a_1 \cdot R \cdot \omega_\beta(t)}{1 + a_2 \cdot R \cdot \omega_\beta(t)} , \quad (7)$$

$$dF_{TP}(\beta, t) = \tau(\beta) \cdot R \cdot d\beta \cdot H = \frac{2Q}{\pi} \cdot \cos\beta \cdot f_0 \cdot \frac{1 + a_1 \cdot R \cdot \omega_\beta(t)}{1 + a_2 \cdot R \cdot \omega_\beta(t)} \cdot d\beta \quad , \quad (8)$$

$$dM_{TP}(\beta, t) = dF_{TP}(\beta, t) \cdot R = \frac{2 \cdot Q \cdot R}{\pi} \cdot \cos\beta \cdot f_0 \cdot \frac{1 + a_1 \cdot R \cdot \omega_\beta(t)}{1 + a_2 \cdot R \cdot \omega_\beta(t)} \cdot d\beta , \quad (9)$$

где $f(t, r)$ - динамический нестационарный и неоднородный в рамках рассматриваемой задачи коэффициент трения; f_0 - коэффициент трения покоя; a_1, a_2 - физические константы пары трущихся материалов [6].

Теперь суммарный момент сил трения на контактной поверхности и суммарный потребный вращающий момент привода определяются так:

$$M_{TP}(t) = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} dM_{TP}(\beta, t) = 4 \cdot \frac{Q \cdot R}{\pi} \int_0^{\pi/2} \cos\beta \cdot f_0 \cdot \frac{1 + a_1 \cdot R \cdot \omega_\beta(t)}{1 + a_2 \cdot R \cdot \omega_\beta(t)} \cdot d\beta =$$

$$= 4 \cdot \frac{Q \cdot R}{\pi} f_0 \cdot \frac{1 + a_1 \cdot R \cdot \omega_\beta(t)}{1 + a_2 \cdot R \cdot \omega_\beta(t)} \cdot \int_0^{\pi/2} \cos\beta \, d\beta = 4 \cdot \frac{Q \cdot R}{\pi} f_0 \cdot \frac{1 + a_1 \cdot R \cdot \omega_\beta(t)}{1 + a_2 \cdot R \cdot \omega_\beta(t)} , \quad (10)$$

$$J_2 \frac{d\omega_\beta}{dt} = M_{BP}(t) - M_{TP}(t) ,$$

$$M_{BP}(t) = J_2 \frac{d\omega_\beta}{dt} + 4 \cdot \frac{Q \cdot R}{\pi} f_0 \cdot \frac{1 + a_1 \cdot R \cdot \omega_\beta(t)}{1 + a_2 \cdot R \cdot \omega_\beta(t)} . \quad (11)$$

В рамках изложенной выше модели были проведены численные расчеты для объекта, движущегося со скоростью 350 м/с, под углом к горизонту Θ_0, и следящей платформы, располагающейся на расстояниях относительно орудия: в боковом направлении - 200 м, в направлении движения объекта - 150 м, в вертикальном направлении - 10 м. Работоспособность изложенного подхода иллюстрируют рис. 3 - 7. Оценивается влияние изменения угла возвышения ствола Θ_0 в пределах от 0 до $\pi/2$.

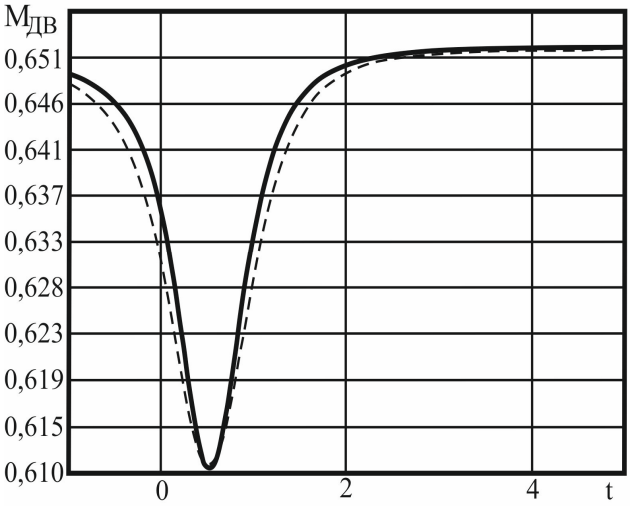


Рис. 3. Зависимость суммарного вращающего момента привода от времени: сплошная линия – для угла возвышения $\Theta_0 = \pi/6$ ***; пунктирная –*** $\Theta_0 = \pi/4$

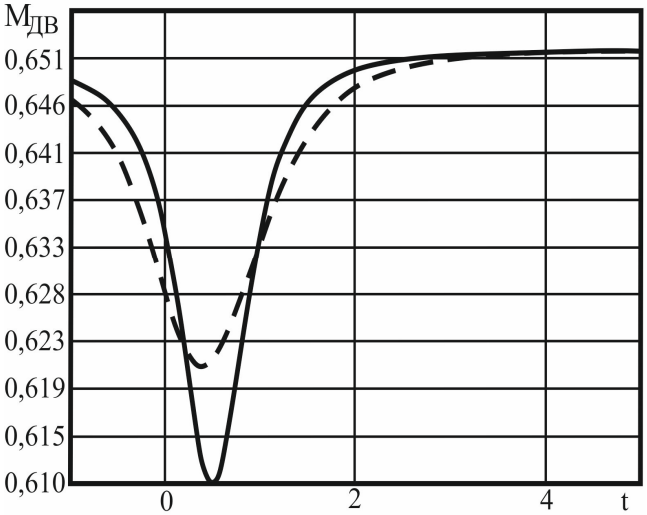


Рис. 4. Зависимость момента движения от времени: сплошная – для угла возвышения $\pi/6$ ***; пунктирная*** $\pi/3$

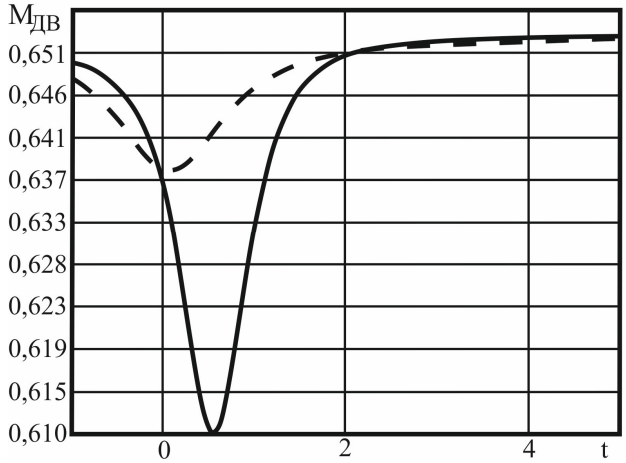


Рис. 5. Зависимость момента движения от времени: сплошная – для угла возвышения $\pi/6$ ***; пунктирная -*** $\pi/2$

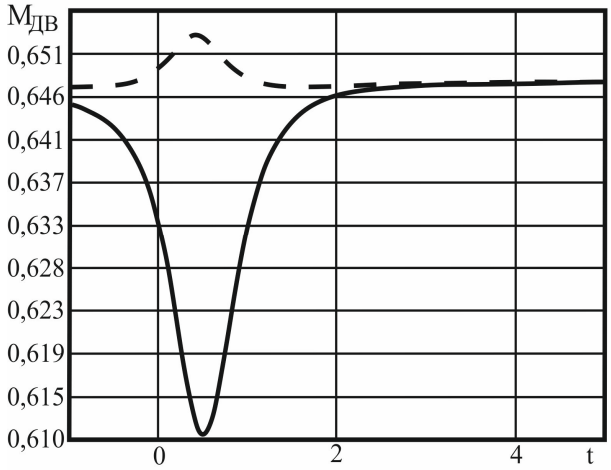


Рис. 6. Зависимость момента движения от времени: сплошная – для угла возвышения $\pi/6$; пунктирная - 0

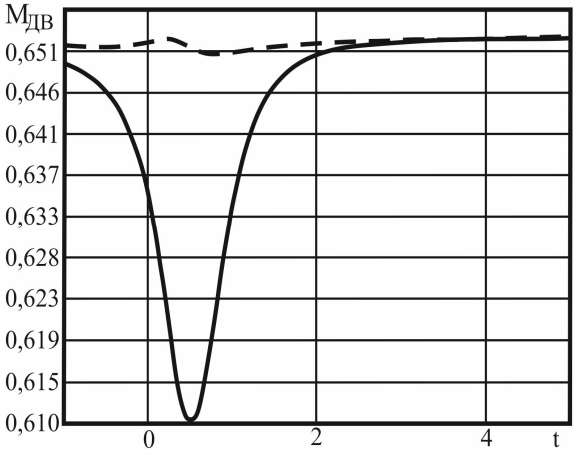


Рис. 7. Зависимость момента движения от времени: сплошная – для угла возвышения $\pi/6$; пунктирная - $\pi/60$

Таким образом, в работе проведено физическое и математическое моделирование формирования управляющего момента силового привода поворотной платформы оптико-электронной аппаратуры в вертикальной плоскости, что в совокупности с полученными в работе [8] результатами является важным эксплуатационным компонентом решения общей задачи визуального сопровождения боеприпасов при проведении внешнебаллистических полигонных испытаний.

Список литературы

1. Методы измерений и измерительная аппаратура, применяемые при полигонных испытаниях боеприпасов / Под. ред. В.Л. Руденко. Н.Тагил: НТИИМ, 2016. 386 с.

2. Чупахин А.П. Разработка и исследование оптического измерительного комплекса для сопровождения объектов, движущихся по сложным траекториям / Диссерт. … канд. техн. наук. Специальность: 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». Ижевск, 2017. 147 с.

3. Баранов В.Л., Колганов А.Г., Чванов А.Е., Чупахин А.П. Модельное обеспечение видеорегистрации внешнетраекторных параметров при проведении полигонных испытаний // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. Вып. 12. Часть 1. С. 28 – 33.

4. Баранов В.Л., Чванов А.Е., Чупахин А.П. Моделирование движения следящей системы в ходе полигонных испытаний изделий // Вопросы оборонной техники. Серия 14. «Проектирование систем вооружения, боеприпасов и измерительных комплексов». М.: НТЦ «Информтехника», 2015. Вып. 2. С. 171 – 174.

5. Елисеев А.К., Чупахин А.П., Лебедев А.А. Расчет параметров работы наземных следящих оптических видеорегистраторов для испытаний боеприпасов // Матер. третьей Всероссийской НТК «Рдултовские чтения». С-Пб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2013. С. 169 - 175.

6. Крагельский И.В., Виноградова И.Э., Коэффициенты трения. М.: МашГИЗ, 1962. 220 с.

7. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Наука, 1966. 608 с.

8. Баранов В.Л., Желтова О.И., Чванов А.Е., Чупахин А.П. Формирование управляющего момента привода поворотной платформы для визуального сопровождения высокодинамичных объектов при проведении полигонных испытаний // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. Вып. 11. С. 130 - 138.

Баранов Виктор Леопольдович, д-р техн. наук, профессор, ivts-spv1411@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Желтова Ольга Игоревна, инженер-программист, web@ntiim.ru, Россия, Нижний Тагил, ФКП «Нижнетагильский институт испытаний металлов»,

Литус Игорь Борисович, начальник отдела, web@ntiim.ru, Россия, Нижний Тагил, ФКП «Нижнетагильский институт испытаний металлов»,

Тер-Данилов Роман Арустамович, канд. техн. наук, доцент, ivts.tulgu@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Чванов Александр Евгеньевич, канд. техн. наук, ученый секретарь, web@ntiim.ru, Нижний Тагил, ФКП «Нижнетагильский институт испытаний металлов»,

Чупахин Антон Петрович, канд. техн. наук, инженер, web@ntiim.ru, Россия, Нижний Тагил, ФКП «Нижнетагильский институт испытаний металлов»

FORMING OF CONTROL DRIVING TORQUE FOR ROTARY SUPPORT USED FOR OPTICAL TRACKING OF DYNAMIC OBJECTS DURING GROUND TESTS

V.L. Baranov, O.I. Zheltova, I. B. Litus, R. A. Ter-Danilov, A.E. Chvanov, A.P. Chupakhin

The problem of determination of torque of power drive for optical tracking equipment was solved. These equipment is used for optical tracking of missiles and projectiles during ground tests. Also, the impact on resulting control moment by integral dynamic frictional moment of rotary support was established.

Key words: ground test, optical tracking, rotary support, contact friction.

Baranov Viktor Leopoldovich, doctor of technical sciences, professor, ivts-spv1411@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Zheltova Olga Igorevna, software engineer, web@ntiim.ru, Russia, Nizhny Tagil, FSE «Nizhny Tagil Institute of Metal Testing»,

Litus Igor Barisovich, head of department, web@ntiim.ru, Russia, Nizhny Tagil, FSE «Nizhny Tagil Institute of Metal Testing»,

Ter-Danilov Roman Arustamovich, candidate of technical sciences, docent, ivts-spv1411@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Chvanov Alexandr Evgenevich, candidate of technical sciences, scientific secretary, web@ntiim.ru, Russia, Nizhny Tagil, FSE «Nizhny Tagil Institute of Metal Testing»,

Chupakhin Anton Petrovich, engineer, web@ntiim.ru, Russia, Nizhny Tagil, FSE «Nizhny Tagil Institute of Metal Testing»

УДК 615.8:612.2; 681.518.5

МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МАТРИЦЫ СОСТОЯНИЯ ДЫХАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

С.И. Зыкин, Н.В. Ивахно

Предложена методика расчета прогнозируемых значений давления в контуре дыхательного тренажера на основе анализа матрицы состояния дыхательной системы с учетом локальных отклонений значений давления с целью проектирования системы автоматического управления нагрузочными характеристиками.

Ключевые слова: дыхательный тренажер, матрица состояния, автоматическая настройка, дыхательная система, состояние человека.

Для нахождения информационных параметров [1] дыхательной системы введены нагрузочные сопротивления относительно начального уровня – свободное дыхание без сопротивления с обозначением R_0, полностью перекрытый дыхательный контур обозначен как R, количество уровней нагрузочных воздействий – N, тогда последовательное изменение нагрузки разобьется на N интервалов и обозначится $i = 0,1...N$. На основании исследования была получена матрица состояний $\mathbf{H}$, характеризующая группу здоровых пациентов, и матрица $\mathbf{R}$, включающая в себя уровни перекрытия дыхательного контура в процентном соотношении [1, 2]:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_{00} & H_{01} & H_{02} & H_{03} \\ H_{10} & H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{20} & H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{30} & H_{31} & H_{32} & H_{33} \\ H_{40} & H_{41} & H_{42} & H_{43} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_0 \\ R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \end{bmatrix},$$

где H_{i0} – угол наклона аппроксимирующей функции α; H_{i1} – угол наклона аппроксимирующей функции β; H_{i2} – время нарастания кривой давления до максимума; H_{i3} – длительность фазы вдоха/выдоха дыхания; R_0 – соответствует свободному дыханию; R_1 – перекрытие дыхательного контура на 20 %; R_2 – перекрытие дыхательного контура на 40 %; R_3 – перекрытие дыхательного контура на 60%; R_4 – перекрытие дыхательного контура на 80 %. Методика нахождения указанных параметров описана в [1, 2, 3].

После определения начального уровня перекрытия дыхательного контура на основании коэффициента общей реакции человека [1] строится экспериментальный график давления (рис. 1).

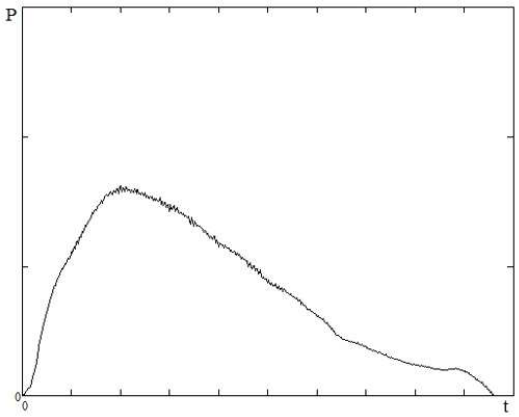


Рис. 1. Экспериментальный график давления в дыхательном контуре

На основании анализа экспериментального графика получена матрица **PE**, характеризующая дыхательную систему при уровне перекрытия дыхательного контура $\mathrm{R_E}$:

$$\mathbf{PE} = [PE_0 \quad PE_1 \quad PE_2 \quad PE_3],$$

где PE_0 – угол наклона аппроксимирующей функции α экспериментального графика; PE_1 –угол наклона аппроксимирующей функции β экспериментального графика; PE_2 – время нарастания кривой давления до максимума экспериментального графика; PE_3 – длительность фазы вдоха/выдоха дыхания экспериментального графика.

Для автоматической настройки сопротивления в процессе тренировки определяется прогнозируемая матрица **PC** и на основании этой матрицы рассчитываются значения давления в дыхательном контуре на единичных участках i фазы вдоха/выдоха:

$$\mathbf{PC} = [PC_0 \quad PC_1 \quad PC_2 \quad PC_3],$$

где PC_0 – угол наклона аппроксимирующей функции α прогнозируемого графика; PC_1 – угол наклона аппроксимирующей функции β прогнозируемого графика; PC_2 – время нарастания кривой давления до максимума прогнозируемого графика; PC_3 – длительность фазы вдоха/выдоха прогнозируемого графика.

Параметры прогнозируемой матрицы PC_0, PC_1 определяются из матрицы состояния **H**, причем значение перекрытия дыхательного контура при получении экспериментальных данных $\mathrm{R_E}$ входит в один из четырех интервалов при получении стандартной диагностической матрицы [3,4]: $\mathrm{R_j \dots R_{j+1}}$; ($\mathrm{R_0 \dots R_1}$, $\mathrm{R_1 \dots R_2}$, $\mathrm{R_2 \dots R_3}$, $\mathrm{R_3 \dots R_4}$). После определения интервала, в котором находится сопротивление R_E, рассчитывается значения PC_0, PC_1 по формулам:

$$PC_0 = \frac{(H_{(j+1)0} - H_{j0}) \cdot (R_E - R_j)}{R_{j+1} - R_j} + H_{j0}; \quad PC_1 = \frac{(H_{(j+1)1} - H_{j1}) \cdot (R_E - R_j)}{R_{j+1} - R_j} + H_{j0},$$

где j – уровень перекрытия дыхательного контура в стандартной матрице **H**.

Обобщенная структура алгоритма расчета давлений приведена на рис. 2.

Объем вдыхаемого воздуха у пациентов сильно варьируется и для нахождения параметров матрицы PC_2, PC_3 необходимо определить площадь под кривой давления S_p у испытуемого при заданном уровне перекрытия дыхательного контура $\mathrm{R_E}$ по формуле:

$$S_p = \frac{PE_3{}^2 \cdot \sin(PE_0) \cdot \sin(PE_1)}{2 \cdot \sin(180 - PE_0 - PE_1)}.$$

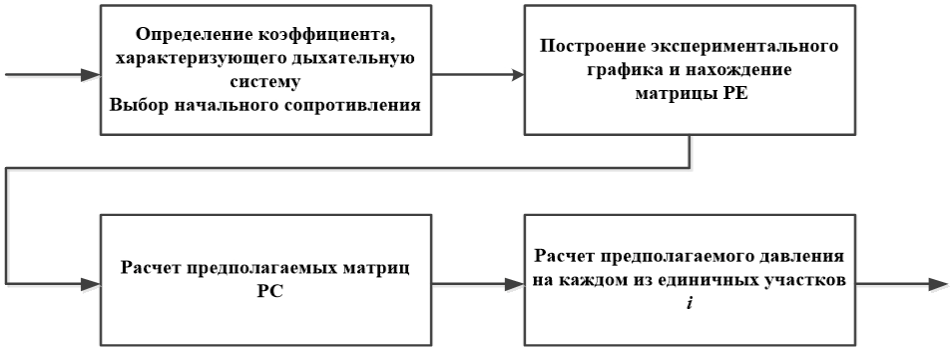


Рис. 2. Структура алгоритма расчета значений давления на единичных участках фазы вдоха/выдоха

На основании площади под кривой давления S_p, углов наклона аппроксимирующих функций PC_0, PC_1 определяется прогнозируемое время нарастания кривой давления до максимума PC_2 и прогнозируемая длительность фазы вдоха/выдоха дыхания PC_3 по формулам:

$$PC_3 = \sqrt{\frac{2 \cdot S_p \cdot \sin(180 - PC_0 - PC_1)}{\sin(PC_0) \cdot \sin(PC_1)}}, \quad PC_2 = \sqrt{\left(\frac{PC_3 \cdot \sin(PC_1)}{\sin(180 - PC_0 - PC_1)}\right)^2 - \left(\frac{2 \cdot S_p}{PC_3}\right)^2}.$$

Время прогнозируемого дыхательного цикла делится на десять единичных участков i и для каждого из участков рассчитывается давление, исходя из матрицы **PC** по формуле:

$$P_i = \frac{2 \cdot i \cdot t \cdot S_p}{PC_3 \cdot PC_2},$$

где P_i – значение давления на единичном участке i фазы вдоха/выдоха; i – номер единичного участка i фазы вдоха/выдоха; t – время единичного участка i фазы вдоха/выдоха соответствующее $\frac{PC_3}{10}$, что отражено на рис. 3.

Формула расчёта значений прогнозируемых давлений на единичных участках i фазы вдоха/выдоха от значения времени PC_2 до окончания дыхательного цикла:

$$P_i = \frac{2 \cdot S_p}{PC_3} - \frac{2 \cdot S_p \cdot (t \cdot i - PC_2)}{PC_3 \cdot (PC_2 - PC_3)}.$$

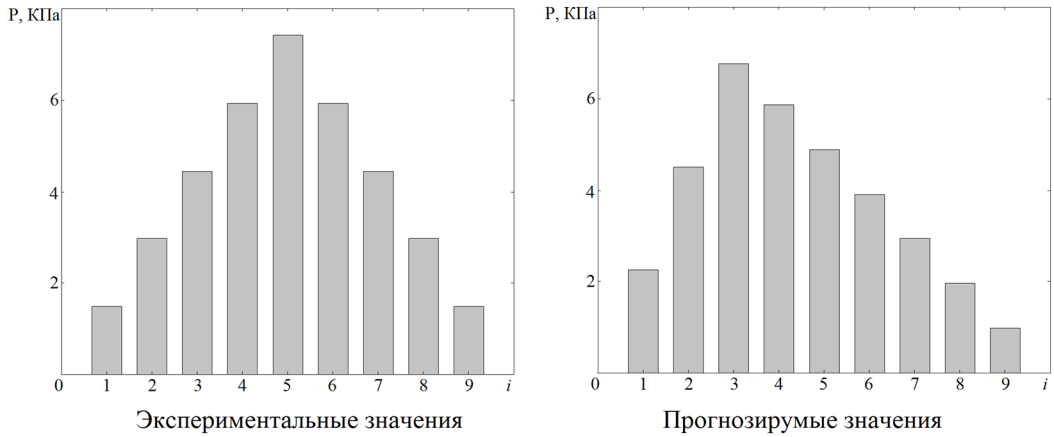


Рис. 3. Гистограмма значений давления на единичных участках i фазы вдоха/выдоха

Прогнозируемые матрицы и прогнозируемые значения давлений на единичных участках i фазы вдоха/выдоха в дыхательном контуре являются инструментом для нахождения несоответствий между формой измеряемого графика давления и нормой, что служит основой для формирования сигнала адаптации нагрузки в виде локальной подстройки сопротивления в процессе тренировки, повышающей ее эффективность.

Список литературы

1. Ивахно Н.В., Зыкин С.И. Математическая модель выбора начального сопротивления в дыхательном контуре на основании данных диагностической матрицы состояний// Известия института инженерной физики// Приборостроение, метрология и информационно – измерительные приборы и системы, 2019. №2. С. 2 - 6.

2. Зыкин С.И. Методика оценки состояния дыхательной системы человека при разных уровнях перекрытия дыхательного контура // Медицинские приборы и технологии. Международный сборник статей. Тула, 2017. №7. С. 107-111.

3. Ивахно Н.В. Метод диагностики состояния дыхательной системы при реализации дроссельного режима воздействия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 5. Ч. 2. С. 92-97.

4. Ivakhno N.V., Zykin S.I. Methods of signal processing and construction of diagnostic matrixes onset by sleep apnea treatment equipment // CEUR Workshop Proceeding. IPERS-ITNT 2018 Image Processing and Earth Remote Sensing. Information Technology and Nanotechnology 2018.Vol-2210. P. 384-391.

Зыкин Сергей Игоревич, аспирант, zykin.s.i@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ивахно Наталия Валериевна, д-р техн. наук., профессор, natalia_iv@list.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

METHOD OF AUTOMATIC ANALYSIS OF THE RESPIRATORY SYSTEM STATE MATRIX FOR THE IMPLEMENTATION OF ADAPTIVE CONTROL

S.I. Zykin, N.V. Ivakhno

A method is proposed for calculating the predicted pressure values on individual sections of the pressure graph in the circuit of a breathing simulator during training, on the basis of which it is possible to determine local deviations of pressure values from the norm in order to design an automatic control system for load characteristics.

Key words: respiratory training, the characteristic pressure, the state matrix, the adjustment work of the respiratory system, the human condition.

Zykin Sergey Igorevich, postgraduate, zykin.s.i@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Ivakho Natalia Valerievna, doctor of technical science, professor natalia_iv@list.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 51-74

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОРИЕНТАЦИИ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ ФАЗОВОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА

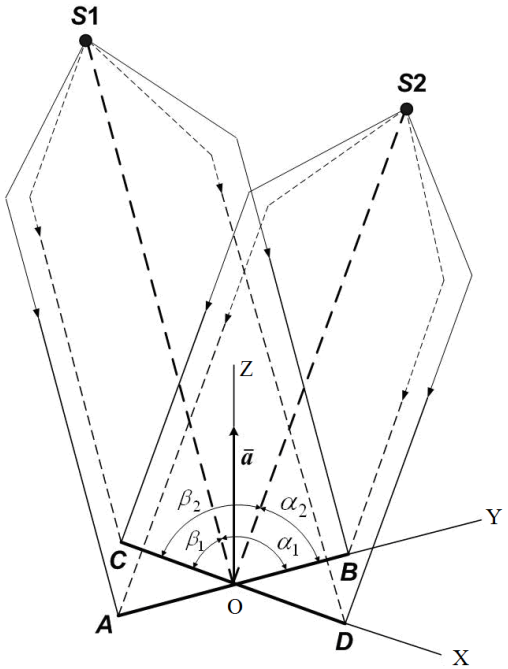
Л.Д. Беленова, О.В. Минина, А.В. Прохорцов, П.С. Усевич

Решение навигационной задачи в части определения параметров угловой ориентации подвижного объекта в пространстве аналитическим способом на основе фазового интерферометрического метода позволяет минимизировать временные затраты на вычислительные преобразования в приемной аппаратуре спутниковой радионавигационной системы без снижения точности.

Ключевые слова: спутниковая радионавигационная система, аналитические выражения, навигационные методы.

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) применяются как для определения координат и скоростей подвижных объектов [1-6], так и для нахождения параметров угловой ориентации [7-14]. Однако в литературе подробно не представлены способы выражения углов курса, тангажа и крена.

Угловые параметры ориентации ПО можно определить, зная известные направления на два навигационных спутника (НС) от объекта [15]. Для этого необходимо обозначить продольную и поперечную оси ПО как *AB* и *CD*. А направления векторов $\overrightarrow{AB}$, $\overrightarrow{CD}$ и осей связанной с ПО системы координат (СК) задать в одном направлении. На рис. показано геометрическое представление способа определения параметров ориентации ПО.



К пояснению способа определения угловой ориентации ПО с помощью двух спутников: S1, S2 – навигационные спутники

Углы $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$, представленные на рисунке, между направлениями на спутники *S1* и *S*2 и отрезками *AB* и *CD* можно определить любым известным методом, рассмотренным в [16-19].

Однако способом, обеспечивающим наибольшую точность определения углов, является фазовый интерферометрический метод, суть которого заключается в измерении разности фаз несущей частоты для сигналов, принимаемых от НС на разнесенные антенны [20]. В таком случае углы между связанной СК с ПОи направлением на НС задаются формулами:

$$\left.\begin{aligned}\cos\alpha_1 = \frac{\Delta\varphi_{11}\cdot\lambda_1}{2\pi\cdot d_1};\cos\alpha_2 = \frac{\Delta\varphi_{21}\cdot\lambda_2}{2\pi\cdot d_1};\\ \cos\beta_1 = \frac{\Delta\varphi_{12}\cdot\lambda_1}{2\pi\cdot d_2};\cos\beta_2 = \frac{\Delta\varphi_{22}\cdot\lambda_2}{2\pi\cdot d_2}\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

где λ_1, λ_2 - длины волн сигналов, излучаемых спутниками *S1* и *S2* соответственно; $\Delta\varphi_{11}$, $\Delta\varphi_{21}$ - разницы фаз сигналов, принимаемых антеннами *A* и *B* от спутников *S1* и *S2* соответственно; $\Delta\varphi_{12}$, $\Delta\varphi_{22}$ - разницы фаз сигналов принимаемых антеннами *C* и *D* от спутников *S1* и *S*2 соответственно; d_1 -расстояние между антеннами *A* и *B*; d_2 -расстояние между антеннами *C* и *D*.

Зная координаты спутников, например в системе координат ПЗ-90 $S1(x_{ПЗ1}, y_{ПЗ1}, z_{ПЗ1})$, $S2(x_{ПЗ2}, y_{ПЗ2}, z_{ПЗ2})$ и точки $O(x_{ПЗ}, y_{ПЗ}, z_{ПЗ})$, расположенной на ПО, по проекциям векторов $\overline{AB}$ и $\overline{BC}$ определяют направления на спутники, т.е. векторы $\overline{OS1}$ $\{x_{ПЗ1}\text{-}x_{ПЗ}; y_{ПЗ1}\text{-}y; z_{ПЗ1}\text{-}z_{ПЗ}\}$ и $\overline{OS2}$ $\{x_{ПЗ2}\text{-}x_{ПЗ}; y_{ПЗ2}\text{-}y; z_{ПЗ2}\text{-}z_{ПЗ}\}$ и в результате вычисляют те же углы: $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$.

Если предположить, что векторы $\overline{AB}$ и $\overline{CD}$ заданы как $\overline{AB}(l_1, m_1, n_1)$; $\overline{CD}(l_2, m_2, n_2)$. Выражения, характеризующие углы между векторами $\overline{OS1}$, $\overline{OS2}$ и $\overline{AB}$, $\overline{CD}$ можно записать следующим образом.

Между $\overline{OS1}$ и $\overline{AB}$:

$$\cos\alpha_1 = \frac{(x_{ПЗ1}-x_{ПЗ})\cdot l_1 + (y_{ПЗ1}-y_{ПЗ})\cdot m_1 + (z_{ПЗ1}-z_{ПЗ})\cdot n_1}{\sqrt{(x_{ПЗ1}-x_{ПЗ})^2 + (y_{ПЗ1}-y_{ПЗ})^2 + (z_{ПЗ1}-z_{ПЗ})^2}\cdot\sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2}}. \quad (2)$$

Между $\overline{OS2}$ и $\overline{AB}$:

$$\cos\alpha_2 = \frac{(x_{ПЗ2}-x_{ПЗ})\cdot l_1 + (y_{ПЗ2}-y_{ПЗ})\cdot m_1 + (z_{ПЗ2}-z_{ПЗ})\cdot n_1}{\sqrt{(x_{ПЗ1}-x_{ПЗ})^2 + (y_{ПЗ1}-y_{ПЗ})^2 + (z_{ПЗ1}-z_{ПЗ})^2}\cdot\sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2}}. \quad (3)$$

Между $\overline{OS1}$ и $\overline{CD}$:

$$\cos\beta_1 = \frac{(x_{ПЗ1}-x_{ПЗ})\cdot l_2 + (y_{ПЗ1}-y_{ПЗ})\cdot m_2 + (z_{ПЗ1}-z_{ПЗ})\cdot n_2}{\sqrt{(x_{ПЗ1}-x_{ПЗ})^2 + (y_{ПЗ1}-y_{ПЗ})^2 + (z_{ПЗ1}-z_{ПЗ})^2}\cdot\sqrt{l_2^2 + m_2^2 + n_2^2}}. \quad (4)$$

Между $\overline{OS2}$ и $\overline{CD}$:

$$\cos\beta_2 = \frac{(x_{ПЗ2}-x_{ПЗ})\cdot l_2 + (y_{ПЗ2}-y_{ПЗ})\cdot m_2 + (z_{ПЗ2}-z_{ПЗ})\cdot n_2}{\sqrt{(x_{ПЗ1}-x_{ПЗ})^2 + (y_{ПЗ1}-y_{ПЗ})^2 + (z_{ПЗ1}-z_{ПЗ})^2}\cdot\sqrt{l_2^2 + m_2^2 + n_2^2}}. \quad (5)$$

Из условия перпендикулярности между векторами $\overline{AB}$ и $\overline{CD}$ можно записать выражение:

$$l_1\cdot l_2 + m_1\cdot m_2 + n_1\cdot n_2 = 0. \quad (6)$$

При условие того, что векторы $\overline{AB}$ и $\overline{CD}$ имеют определенные длины d_1 и d_2 соответственно, выражение (6) примет вид:

$$\left.\begin{aligned}l_1^2 + m_1^2 + n_1^2 = d_1^2;\\ l_2^2 + m_2^2 + n_2^2 = d_2^2.\end{aligned}\right\} \quad (7)$$

Решая систему уравнений (2) - (7) с учетом (1), можно найти l_1, m_1, n_1 и l_2, m_2, n_2, векторы $\overline{AB}(l_1, m_1, n_1)$; $\overline{CD}(l_2, m_2, n_2)$, которые совпадают с осями связанной с ПО СК, и определяют их положение в геоцентрической СК.

Предлагается использовать численное решение системы (1) - (6), так как в литературе не приводится конечной формулы для определения местоположения ПО. Поэтому было получено аналитическое определение системы, для чего использовался метод последовательного исключении неизвестных (метод Гаусса).

После преобразования неизвестные l_1, m_1, n_1 и l_2, m_2, n_2 определены по выражениям:

$$n_1 = \frac{-(2f_1p+2t_1c)\pm\sqrt{D_1}}{2(1+p^2+c^2)};\ m_1 = t_1 + cn_1;\ \ l_1 = f_1 + pn_1; \tag{8}$$

$$n_2 = \frac{-(2f_2p+2t_2c)\pm\sqrt{D_2}}{2(1+p^2+c^2)};\ \ m_2 = t_2 + cn_2;\ \ l_2 = f_2 + pn_2; \tag{9}$$

где

$$x_1 = (x_{s1} - x_0);\ x_2 = (x_{s2} - x_0);\ \ y_1 = (y_{s1} - y_0);\ \ y_2 = (y_{s2} - y_0);$$
$$z_1 = (z_{s1} - z_0);\ z_2 = (z_{s2} - z_0);\ k_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2};\ k_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2};$$
$$A_1 = cos\alpha_1;\ A_2 = cos\alpha_2;\ B_1 = cos\beta_1;\qquad B_2 = cos\beta_2;$$
$$t_1 = \frac{A_2d_1k_2x_1 - A_1d_1k_1x_2}{x_1y_2 - x_2y_1};\ \ t_2 = \frac{B_2d_2k_2x_1 - B_1d_2k_1x_2}{x_1y_2 - x_2y_1};$$
$$f_1 = \frac{A_1d_1k_1y_2 - A_2d_1k_2y_1}{x_1y_2 - x_2y_1};\ \ f_2 = \frac{B_1d_2k_1y_2 - B_2d_2k_2y_1}{x_1y_2 - x_2y_1};$$
$$c = \frac{z_1x_2 - z_2x_1}{x_1y_2 - x_2y_1};\ p = \frac{z_2y_1 - z_1y_2}{x_1y_2 - x_2y_1};$$
$$D_1 = (2f_1p + 2t_1c)^2 - 4(1 + p^2 + c^2)(f_1^2 + t_1^2 - d_1^2);$$
$$D_2 = (2f_2p + 2t_2c)^2 - 4(1 + p^2 + c^2)(f_2^2 + t_2^2 - d_2^2).$$

Проведенное численное моделирование выражений (8) и (9) в прикладной программе Mathcad подтвердило правильность полученных формул.

Положение третьей оси связанной СК с ПО $\bar{a}$ можно найти как векторное произведение векторов $\overline{CD}$ и $\overline{AB}$:

$$\bar{a} = \{\overline{CD} \times \overline{AB}\}. \tag{10}$$

или

$$\bar{a} = \{(m_2 \cdot n_1 - n_2 \cdot m_1);\ (l_2 \cdot n_1 - n_2 \cdot l_1);\ \ (l_2 \cdot m_1 - m_2 \cdot l_1)\}.$$

Таким образом, получены три компланарных вектора: $\overline{AB}$, $\overline{CD}$ и $\bar{a}$, которые совпадают с осями связанной с ПО СК и определяют ориентацию ПО относительно геоцентрической СК ПЗ-90.

Теперь можно в табл. представить матрицу направляющих косинусов C_0, характеризующую положение связанной с ПО СК *OXYZ* (причем положительное направление оси *OX* совпадает с направлением $\overline{CD}$, положительное направление оси *OY* - с направлением $\overline{AB}$, а положительное направление оси *OZ* - с направлением $\bar{a}$) относительно геоцентрической СК $O_{ПЗ}X_{ПЗ}Y_{ПЗ}Z_{ПЗ}$.

Матрица направляющих косинусов

Оси	*OX*	*OY*	*OZ*
$O_{ПЗ}X_{ПЗ}$	$c_{11}{}^0$	$c_{12}{}^0$	$c_{13}{}^0$
$O_{ПЗ}Y_{ПЗ}$	$c_{21}{}^0$	$c_{22}{}^0$	$c_{23}{}^0$
$O_{ПЗ}Z_{ПЗ}$	$c_{31}{}^0$	$c_{32}{}^0$	$c_{33}{}^0$

В табл. приведены следующие обозначения:

$$c_{11}{}^0 = \frac{l_2}{\sqrt{l_2{}^2 + m_2{}^2 + n_2{}^2}};\ \ c_{21}{}^0 = \frac{m_2}{\sqrt{l_2{}^2 + m_2{}^2 + n_2{}^2}};\ c_{31}{}^0 = \frac{n_2}{\sqrt{l_2{}^2 + m_2{}^2 + n_2{}^2}};$$

$$c_{12}{}^0 = \frac{l_1}{\sqrt{l_1{}^2 + m_1{}^2 + n_1{}^2}};\quad c_{22}{}^0 = \frac{m_1}{\sqrt{l_1{}^2 + m_1{}^2 + n_1{}^2}};\quad c_{32}{}^0 = \frac{n_1}{\sqrt{l_1{}^2 + m_1{}^2 + n_1{}^2}};$$

$$c_{13}{}^0 = \frac{(m_2 \cdot n_1 - n_2 \cdot m_1)}{\sqrt{(m_2 \cdot n_1 - n_2 \cdot m_1)^2 + (l_2 \cdot n_1 - n_2 \cdot l_1)^2 + (l_2 \cdot m_1 - m_2 \cdot l_1)^2}};$$

$$c_{23}{}^0 = \frac{(l_2 \cdot n_1 - n_2 \cdot l_1)}{\sqrt{(m_2 \cdot n_1 - n_2 \cdot m_1)^2 + (l_2 \cdot n_1 - n_2 \cdot l_1)^2 + (l_2 \cdot m_1 - m_2 \cdot l_1)^2}};$$

$$c_{33}{}^0 = \frac{(l_2 \cdot m_1 - m_2 \cdot l_1)}{\sqrt{(m_2 \cdot n_1 - n_2 \cdot m_1)^2 + (l_2 \cdot n_1 - n_2 \cdot l_1)^2 + (l_2 \cdot m_1 - m_2 \cdot l_1)^2}}.$$

Угловое положение ПО по отношению к базовой СК определяется углами рыскания ψ, тангажа υ и крена γ, которые через направляющие косинусы можно представить в виде:

$$\psi = \operatorname{arctg}\frac{-c_{31}}{c_{11}};\quad \upsilon = \arcsin(c_{21});\quad \gamma = \operatorname{arctg}\frac{-c_{23}}{c_{22}}.$$

Полученные аналитическим способом выражения для углов тангажа, крена и курса позволяют упростить вычислительные процессы, протекающие в программной части приемной аппаратуры СРНС и сократить время, необходимое на определение параметров ориентации ПО в пространстве. Что является очень важным при обеспечении боевых действий военно-воздушных сил и воздушно-космической обороны, эффективность которых находится в прямой зависимости от времени и качества определения пространственного местоположения ПО.

Список литературы

1. Патент RU 2338160 C1. Способ определения параметров навигации / Богданов М.Б., Савельев В.В., Смирнов В.А., Сухинин Б.В., Прохорцов А.В., Чепурин А.А. Опубл. 10.11.2008. Бюл. №31.

2. Патент RU 2329469 C1. Способ определения параметров навигации /Богданов М.Б., Савельев В.В., Смирнов В.А., Сухинин Б.В., Прохорцов А.В., Чепурин А.А. Опубл. 20.07.2008. Бюл. № 20.

3. Прохорцов А.В., Савельев В.В. Методы определения координат и скорости подвижных объектов с помощью спутниковых радионавигационных систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Вып. 2. С. 264-274.

4. Прохорцов А.В., Минина О.В. Аналитическое решение навигационной задачи на основе разностно – дальномерного метода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 6. С. 123-126.

5. Прохорцов А. В., Минина О. В. Аналитическое решение навигационной задачи на основе разностно-радиально-скоростного метода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 9. С. 276-279.

6. Прохорцов А.В., Савельев В.В. Основы функционирования спутниковых навигационных систем: учебное пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 104 с.

7. Прохорцов А.В. Методы определения параметров ориентации подвижных объектов по сигналам спутниковых радио - навигационных систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 1. С. 258-267.

8. Патент на изобретение RU 2276384 C2. Способ определения угловой ориентации объекта/ Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В. Опубл. 20.08.2009. Бюл. №23.

9. Патент RU 2248004 C2. Способ определения угловой ориентации объекта / Блинов В.В., Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В., Сухинин Б.В. Опубл. 10.03.2005. Бюл. № 7.

10. Прохорцов А.В. Способы определения параметров ориентации подвижных объектов по сигналам спутниковых навигационных систем. Монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. 80 с.

11. Патент на изобретение RU 2414685 C1. Способ определения угловой ориентации объекта / Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В., Власов А.Ю., Данилов М.Б. Опубл. 20.03.2011. Бюл. № 8.

12. Прохорцов А.В., Уварова Н.А.Обзор современной приемной аппаратуры СНС российского производства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 5. С. 165-170.

13. Патент на изобретение RU 2276384 C2. Способ определения угловой ориентации объекта / Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В. Опубл. 20.08.2009. Бюл. №23.

14. Prokhortsov A.V., Savelev V.V., Smirnov V.A A method of orientation data correction of a strap down inertial navigation system by signals received from one satellite navigation system antenna. // 19th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2012 - Proceedings. 19. 2012. P. 232-234.

15. Прохорцов А.В., Богданов М.Б., Савельев В.В., Сухинин Б.В. Метод определения параметров ориентации с помощью СНС, основанный на измерении координат трех его точек // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2006. С. 309.

16. Патент на изобретение RU 2422844 C2. Способ определения угловой ориентации объекта / Богданов М.Б., Савельев В.В., Смирнов В.А., Прохорцов А.В., Чепурин А.А., Опуб. 27.06.2011. Бюл. № 18.

17. Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В., Сухинин Б.В. Интерферометрический метод определения параметров ориентации ЛА / Полет. Общероссийский научно-технический журнал. Москва: Изд-во Машиностроение-Полет. 2007. Вып. 11. С. 45-47.

18. Прохорцов А.В Возможности определения параметров угловой ориентации по сигналам одной антенны СНС // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 11. С. 74-79.

19. Прохорцов А.В. Метод повышения точности определения параметров ориентации путем совместной обработки сигналов БИНС и приемной аппаратуры СНС с применением одной антенны по сигналам с трех и более навигационных спутников // Известия Института инженерной физики. 2018. Вып. 3. С. 31-36.

20. Прохорцов А.В., Савельев В.В., Смирнов В.А. Способ коррекции показаний БИНС по параметрам ориентации по сигналам одной антенны СНС // XIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. 2012. С. 208-210.

Беленова Любовь Даниловна, студент, pbs.tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Минина Ольга Владимировна, аспирант, OL-within-sun@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Прохорцов Алексей Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, proxav@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Усевич Павел Сергеевич, студент, pbs.tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYTICAL DETERMINATION OF THE ORIENTATION PARAMETERS OF A MOVING OBJECT BASED ON THE PHASE INTERFERROMETRIC METHOD

L.D. Belenova, O.V. Minina, A.V. Prokhortsov, P.S. Usevich

The solution of the navigation problem in terms of determining the parameters of the angular orientation of a moving object in space by an analytical method based on the phase interferometric method allows minimizing the time spent on computational transformations in the receiving equipment of a satellite radio navigation system without reducing accuracy.

Key words: satellite radio navigation system, analytical expressions, navigation methods.

Belenova Lyubov Danilovna, student, pbs.tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Minina Olga Vladimirovna, postgraduate, OL-within-sun@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Prokhortsov Alexey Vyacheslavovich, candidate of technical sciences, docent, head of department, proxav@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Usevich Pavel Sergeevich, student, pbs.tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 629.056.8

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПСЕВДОРАДИАЛЬНО-СКОРОСТНОГО МЕТОДА

А.В. Прохорцов, О.В. Минина

Разработанный аналитический подход к определению скорости движения высоко маневренных подвижных объектов на основе псевдорадиально-скоростного метода по сигналам спутниковой радионавигационной системы позволяет сократить время на математические преобразования и повысить точность решений навигационных задач.

Ключевые слова: спутниковая радионавигационная система, аналитические выражения, навигационные методы, навигационные параметры, псевдорадиально-скоростной метод.

Потенциал применения аналитических выражений в части решения навигационных задач по определению скорости подвижных объектов (ПО) по сигналам спутниковой радионавигационной системы еще достаточно не изучен [1 - 4]. Но в условиях, когда важно сократить время, необходимое на вычислительные процессы без снижения точности, удобнее использовать конечные формулы, реализуемые практически в масштабе реального времени.

Определение радиальной скорости движения ПО может осуществлять псевдорадиально-скоростным методом, позволяющим произвести вычисления отклонения шкалы времени ПО от шкалы времени навигационного спутника (НС). Данный метод определяет вектор скорости ПО при наличии неизвестного смещения частоты сигнала [5]. Выражение для радиальной скорости можно представить в виде двух слагаемых:

$$\dot{D}_{изм\,i} = \dot{D}_i + \dot{D}'_i, \quad (1)$$

где $\dot{D}'_i = \lambda \cdot \Delta f_{нестаб}$, λ – длина волны принимаемого сигнала; $\Delta f_{нестаб}$ – смещение частоты сигнала; $\dot{D}_i$ – радиальная скорость сближения от i-ого спутника до ПО.

Также формулу (1) можно выразить в следующем виде:

$$\dot{D}_{изм\,i} = \frac{\left[(x - X_i)\cdot(\dot{x} - \dot{X}_i) + (y - Y_i)\cdot(\dot{y} - \dot{Y}_i) + (z - Z_i)\cdot(\dot{z} - \dot{Z}_i)\right]}{D_i} + \dot{D}'_i, \quad (2)$$

где (X_i, Y_i, Z_i) - координаты и $(\dot{X}_i, \dot{Y}_i, \dot{Z}_i)$ - проекции вектора скорости i-ого НС; (*x*, *y*, *z*) - координаты ПО.

Для нахождения вектора скорости ПО $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ и поправки $\dot{D}'_i$ необходимо провести измерения по четырем НС и решить систему четырех уравнений (2), однако для этого потребуется информация о дальностях D_i от *i*-ого НС до ПО и координатах (*x*, *y*, *z*) подвижного объекта.

Для решения навигационной задачи в части определения скорости были получены аналитические выражения проекций вектора скорости ПО на основе псевдорадиально-скоростного метода, для чего использовался метод Гаусса.

После преобразований составляющие проекции вектора скорости объекта могут быть определены по следующим формулам:

$$\dot{x} = \frac{ws_1t_1 - qkpt_1 + qjut_1 - lkqs_1 + lwfs_1}{qt_1(mj - pe) + ls_1(gf - qe) + s_1t_1g}, \quad (3)$$

$$\dot{y} = \frac{ks_2t_2 - wpet_2 + luet_2 - jues_2 + mkjs_2}{et_2(nl - qp) + ft_2s_2 + js_2(fm - en)}, \quad (4)$$

$$\dot{z} = \frac{ks_3t_3 - qet_3u + et_3nw - efs_3w + gkfs_3}{et_3(nl - pq) + fs_3(jg - el) + js_3t_3}, \quad (5)$$

где

$$a = \dot{D}_{изм\,1}D_1 + (x - X_1)\dot{X}_1 + (y - Y_1)\dot{Y}_1 + (z - Z_1)\dot{Z}_1, \quad e = D_2[x - X_1] - D_1[x - X_2],$$

$$b = \dot{D}_{изм\,2}D_2 + (x - X_2)\dot{X}_2 + (y - Y_2)\dot{Y}_2 + (z - Z_2)\dot{Z}_2, \quad f = D_2[y - Y_1] - D_1[y - Y_2],$$

$$c = \dot{D}_{изм\,3}D_3 + (x - X_3)\dot{X}_3 + (y - Y_3)\dot{Y}_3 + (z - Z_3)\dot{Z}_3, \quad j = D_2[z - Z_1] - D_1[z - Z_2],$$

$$d = \dot{D}_{изм\,4}D_4 + (x - X_4)\dot{X}_4 + (y - Y_4)\dot{Y}_4 + (z - Z_4)\dot{Z}_4, \quad g = D_3[x - X_1] - D_1[x - X_3],$$

$$k = aD_2 - bD_1,\ q = D_3[y - Y_1] - D_1[y - Y_3],\ l = D_3[z - Z_1] - D_1[z - Z_3], \quad w = aD_3 - cD_1,$$

$$m = D_4[x - X_1] - D_1[x - X_4], \quad n = D_4[y - Y_1] - D_1[y - Y_4], \quad p = D_4[z - Z_1] - D_1[z - Z_4],$$

$$u = aD_4 - dD_1,\ s_1 = fp - jn,\ s_2 = gp - ml,\ t_1 = qj - lf,\ t_2 = pe - jm,\ s_3 = mq - ng,$$

$$t_3 = qe - fg.$$

Необходимо отметить, что координаты ПО (x, y, z) могут быть определены на основе дальномерного или разностно-дальномерного методов [6, 7].

Для подтверждения эффективности применения полученных формул (3), (4), (5) было осуществлено программное моделирование в среде Mathcad на основе результатов исследовательских испытаний, проведенных на геодезическом оборудовании**,** соединяющем в одном корпусе GPS процессор геодезического класса, антенну, память и элементы питания. Результаты исследовательского эксперимента по определению составляющих вектора скорости ПО представлены в табл.

Исходя из данных, отображенных в табл., можно определить, что математическое моделирование проведено корректно, так как при анализе выражений получены одинаковые значения параметров скорости движения ПО численным и аналитическими методами.

Осуществив анализ эффективности применения аналитического подхода в части сокращения временных затрат, требуемых на математические преобразований, можно сделать вывод, что время расчета на основе псевдорадиально-скоростного метода сократилось всего на 3 %, но в условиях военной обстановки даже небольшое сокращение времени определения скорости ПО может повлиять на результат того или иного действия.

Сравнительные характеристики численного и аналитического методов определения скорости

Оцениваемый параметр		Расчет аналитическим методом в Mathcad	Расчет численным методом в Mathcad
Проекции скорости движения	V_x, м/с	4.80911665×10^{-16}	4.80911665×10^{-16}
	V_y, м/с	$-1.05535800\times10^{-15}$	$-1.05535800\times10^{-15}$
	V_z, м/с	$-1.04830788\times10^{-15}$	$-1.04830788\times10^{-15}$
Время расчета, %		97	100

Следовательно, можно подвести итог, что предложенный аналитический способ решения навигационной задачи по сравнению с численным позволяет минимизировать время, затрачиваемое на математические преобразования, что увеличивает быстродействие вторичной обработки, осуществляемой в вычислительных устройствах приемной аппаратуры спутниковой радионавигационной системы.

Таким образом, разработанное аналитическое решение навигационной задачи по определению скорости движения объектов различного назначения возможно реализовать в программной части устройств бортовой ПА, имеющей ограниченный вычислительный ресурс, что позволит использовать более дешевые устройства, поэтому данный подход актуально использовать в военной области на летательных аппаратах, осуществляющих единственный короткий полет, например, на управляемых ракетах, или в гражданских целях.

Список литературы

1. Прохорцов А.В., Савельев В.В. Методы определения координат и скорости подвижных объектов с помощью спутниковых радионавигационных систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Вып. 2. С. 264-274.

2. Патент на изобретение RU 2329469 C1. Способ определения параметров навигации / Богданов М.Б., Савельев В.В., Смирнов В.А., Сухинин Б.В., Прохорцов А.В., Чепурин А.А. Опубл. 20.07.2008. Бюл. №20.

3. Прохорцов А.В., Минина О.В. Аналитическое решение навигационной задачи на основе разностно-радиально-скоростного метода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 9. С. 276-279.

4. Патент на изобретение RU 2338160 C1. Способ определения параметров навигации / Богданов М.Б., Савельев В.В., Смирнов В.А., Сухинин Б.В., Прохорцов А.В., Чепурин А.А. Опубл. 10.11.2008. Бюл. №31.

5. Прохорцов А.В., Савельев В.В. Основы функционирования спутниковых навигационных систем: учеб. пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 104 с.

6. Уварова Н.А., Прохорцов А.В. Аналитическое нахождение координат по сигналам СНС на основе дальномерного метода: сб. докл. науч.-техн. конф. «Инновационные наукоемкие информационные технологии». Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С. 62-65.

7. Прохорцов А.В., Минина О.В. Аналитическое решение навигационной задачи на основе разностно – дальномерного метода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 6. С. 123-126.

Прохорцов Алексей Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, proxav@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Минина Ольга Владимировна, аспирант, OL-within-sun@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYTICAL DETERMINATION OF THE MOVEMENT SPEED OF SMALL OBJECTS ON THE BASIS OF THE PSEUDO-RADIAL-SPEED METHOD

A.V. Prokhortsov, O.V. Minina

The developed analytical approach to determining the speed of movement of highly maneuverable mobile objects based on the pseudo-radial-speed method from the signals of the satellite radio navigation system makes it possible to reduce the time for mathematical transformations and increase the accuracy of solutions to navigation problems.

Key words: satellite radio navigation system, analytical expressions, navigation methods, navigation parameters, pseudo-radial speed method.

Prokhortsov Alexey Vyacheslavovich, candidate of technical sciences, docent, head of department, proxav@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Minina Olga Vladimirovna, postgraduate, OL-within-sun@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 531.383

ВОЛНОВОЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ГИРОСКОП С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ

В.В. Матвеев

Рассматриваются особенности построения волновых твердотельных гироскопов (ВТГ) с металлическим резонатором. Теоретически и экспериментально показана нелинейная зависимость колебаний пучности и узла стоячей волны резонатора от угловой скорости основания ВТГ прямого измерения. Предложен способ формирования выходного сигнала разомкнутого ВТГ, позволяющий расширить линейную зону характеристики. Приведена структурная схема ВТГ для огибающих колебаний узла и пучности, позволяющая анализировать характеристики ВТГ без учета высокочастотной несущей колебаний резонатора. Проанализированы кривые затуханий колебаний резонатора при работе ВТГ в режиме интегрирующего гироскопа.

Ключевые слова: волновой твердотельный гироскоп, пучность, узел, нелинейность, огибающие колебаний.

Введение. В настоящее время волновые твердотельные гироскопы (ВТГ) с металлическим резонатором являются одними из перспективных датчиков первичной информации подвижных объектов по соотношению цена/точность. Производство ВТГ не требуют специальных технологий, таких как фотолитография и травление кремния, как например, при производстве микромеханических гироскопов или объемной обработки кварцевого стекла при изготовлении полусферических резонаторов.

Принцип действия ВТГ основан на эффекте инерции стоячих волн, возбуждаемых в металлическом резонаторе, открытом еще в конце XIX века английским математиком и механиком Дж. Х. Брайаном. При возбуждении стоячей волны в тонкостенном бокале, точки его кромки будут иметь радиальные колебания. Точки с максимальной амплитудой радиальных колебаний называются пучностями (*antinode*), а с минимальной – узлами (*node*) (рис. 1). Брайан наблюдал в микроскоп колеблющуюся кромку тонкостенного бокала, расположенного на вращающемся столике и установил, что число пучностей (узлов) стоячей волны, проходящей через объектив меньше числа поворотов столика с бокалом. При этом волновая картина колеблющейся оболочки будет отставать от поворота основания в соответствии с зависимостью [1]:

$$\varphi = -\frac{2}{k^2+1}\int_0^t \Omega(\tau)d\tau, \qquad (1)$$

где φ – угол отставания волновой картины; k – номер формы колебаний; Ω – угловая скорость основания.

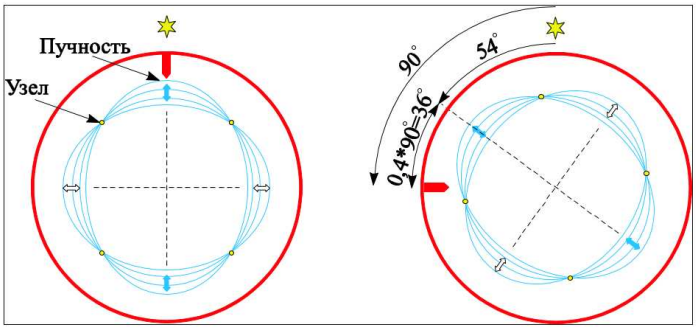


Рис. 1. Запаздывание волновой картины при повороте основания

Для второй формы колебаний (k = 2) при постоянной угловой скорости основания имеем угол отставания волновой картины:

$$\varphi = -0{,}4\Omega \cdot t\,.$$

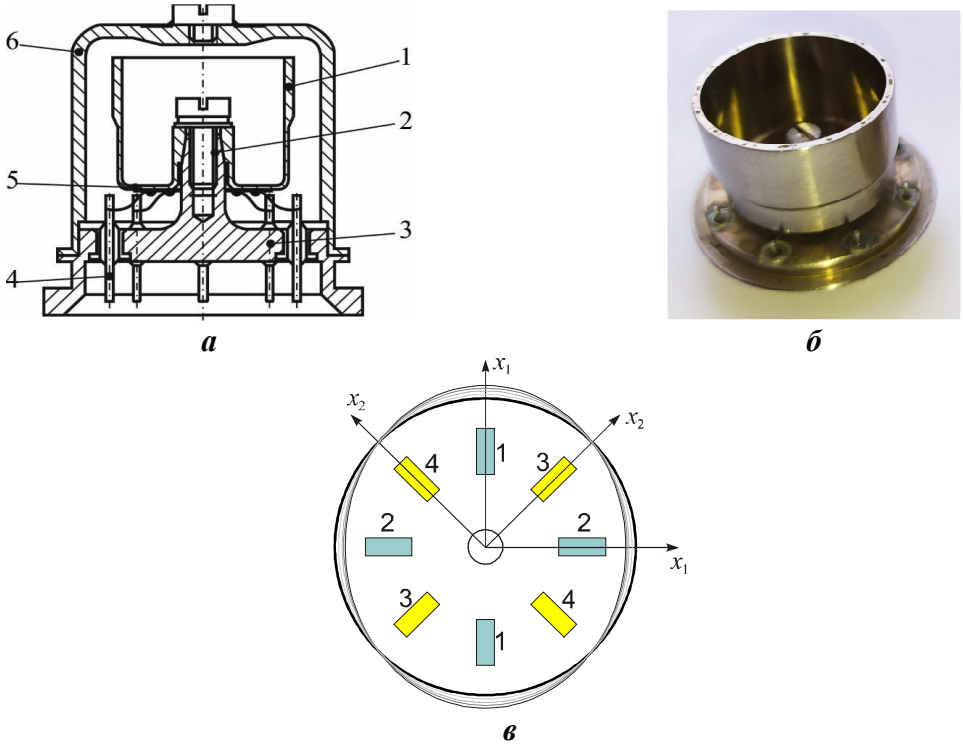
Коэффициент K = 0,4 называется коэффициентом Брайана, который характеризует, что стоячая волна поворачивается в пространстве на угол меньший угла поворота корпуса. Например, если основание повернется относительно инерциального пространства на угол 90°, то стоячая волна (пучности и узлы) будет отставать на угол 0,4*90° = 36°. Следовательно, относительно инерциального пространства волна повернется на 54°. В аналогичных условиях классический гироскоп с быстровращающимся ротором, в силу свойства сохранять направление своей главной оси неизменной в инерциальном пространстве, будет отставать от поворота основания на 90°.

На эффекте инерции стоячей волны могут быть реализованы интегрирующие гироскопы и датчики угловой скорости. Для реализации интегрирующего гироскопа требуется, так называемое, позиционное возбуждение резонатора, при котором стоячая волна «свободна» относительно корпуса. После прекращения вращения основания волна остается неподвижной в том положении, которое было достигнуто в процессе вращения. При реализации датчика угловой скорости возбуждение стоячей волны происходит вдоль фиксированного направления и стоячая волна, как бы «привязана» к корпусу прибора. После прекращения вращения основания волна возвращается к исходному направлению, создаваемому системой возбуждения.

Преимуществом ВТГ по сравнение с классическими гироскопами является отсутствие подвижных частей, что позволяет создавать приборы длительного ресурса работы.

Конструкция волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором. Прототипом многих разработок ВТГ является конструкция гироскопа компании *Innalabs, Ltd* (рис. 2, а) [2]. Металлический резонатор 1 устанавливается на основание 3 при помощи винта 2. Пьезоэлементы 5 наклеиваются на дно резонатора равномерно через 45°. Пьезоэлементы при помощи токоподводводов подключаются к гермовыводам 4. На рис. 2 б приведена фотография образца ВТГ-ДУС без кожуха. Материал резонатора – 21 НКМТ-ВИ. На верхней кромке резонатора видны углубления, как результат его балансировки. Резонатор закрывается кожухом 6 и вакуумируется. Схема наклеивания пьезоэлентов на дно резонатора показана на рис. 2 в.

При реализации ВТГ-ДУС для возбуждения стоячей волны на пьезоэлементы 1-1 (рис. 2, в) подается гармонический сигнал на частоте равной частоте второй формы колебаний резонатора. Сигналы, снимаемые с пьезоэлементов 2-2, служат для контроля резонанса. С пьезоэлементов 3-3 снимается сигнал, вызванный вращением основания, который обрабатывается и подается на пьезоэлементы 4-4, формируя цепь обратной связи. Сигнал обратной связи несет информацию об угловой скорости основания.



а ***б*** ***в***

Рис. 2. ВТГ с металлическим резонатором: а – конструктивная схема; б – фотография образца; в – схема расположения пьезоэлементов

Математическая модель ВТГ-ДУС. Анализ характеристик ВТГ осуществляется на основе исследования уравнений движения резонатора в режимах возбуждения и чувствительности соответственно. Математическая модель ВТГ приведена в многочисленной литературе, которая, как правило, сводится к системе двух обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих первичные колебания (режим возбуждения) и вторичные колебания (режим чувствительности), предложенных Д. Линчем (*D. Lynch*) [3 – 4], которая вытекает из рассмотрения движения двумерного линейного осциллятора и с некоторой модификацией может быть представлена так:

$$\left.\begin{aligned} \ddot{x}_1 + 2\xi\omega_1\dot{x}_1 + (\omega_1^2 - \Omega^2)x_1 = f_0 \sin \nu t + 2K\Omega\dot{x}_2 + N_1\dot{\Omega}x_2, \\ \ddot{x}_2 + 2\xi\omega_2\dot{x}_2 + (\omega_2^2 - \Omega^2)x_{21} = -2K\Omega\dot{x}_1 - N_2\dot{\Omega}x_1, \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

где x_1, x_2; ω_1, ω_2 – фазовые координаты и собственные частоты резонатора в режиме возбуждения и чувствительности соответственно; ξ – относительный коэффициент демпфирования; Ω – угловая скорость основания; K – коэффициент Брайана; N_1, N_2 – коэффициенты углового ускорения; f_0, ν – амплитуда и частота, ускорения резонатора, придаваемая пьезоэлементами возбуждения.

Амплитуды установившихся колебаний пучности и узла, полученные по математической модели (2) определяются зависимостями [5]:

$$x_{10}^{\text{уст}} = \frac{Tf_0}{2\nu(1+n\Omega^2)}, \; x_{20}^{\text{уст}} = \frac{T^2Kf_0}{2\nu}\frac{\Omega}{1+n\Omega^2}, \quad (3)$$

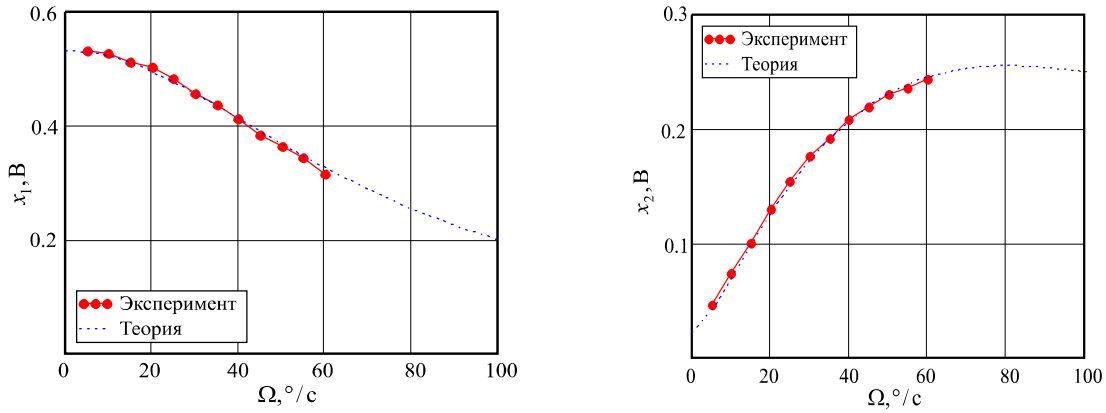
где $T = 2Q/\nu$ – постоянная времени резонатора ($Q = 1/(2\xi)$ – добротность); $n = K^2T^2$ – коэффициент нелинейности.

Экспериментальные исследования ВТГ, совместного производства Мичуринский завод «Прогресс» – «Тульский государственный университет» показали, что образцы металлических резонаторов диаметром 22 мм имеют добротность около 30 000 и собственную частоту не более 6 кГц, что соответствует постоянной времени T≈1,5 с.

На рис. 3, а, б приведены экспериментальные графики зависимости амплитуд пучности и узла колебаний ВТГ без контура обратной связи от угловой скорости основания в резонансном режиме. Там же приведены кривые на основе теоретических зависимостей (3) амплитуд установившихся колебаний пучности и узла, показывающие высокую сходимость с экспериментом. Максимум амплитуды колебаний узла достигается при угловой скорости

$$\Omega_{\max} = \frac{1}{TK} = \frac{\nu}{2QK}. \qquad (4)$$

Для приведенных выше параметров резонаторов максимум амплитуды колебаний узла будет достигаться при угловой скорости основания около 90 °/с.



а ***б***

Рис. 3. Зависимость амплитуд первичных и вторичных колебаний КВГ с металлическим цилиндрическим резонатором от угловой скорости основания

Таким образом, если рассматривать ВТГ без контура компенсации кориолисового ускорения и в качестве информативного параметра использовать амплитуду колебаний узла, то в этом случае ВТГ будет обладать чрезвычайно малым линейным диапазоном (до 10 °/с). Для преодоления этого ограничения при работе разомкнутого ВТГ, предложено формировать сигнал об измеряемой угловой скорости, как отношение амплитуды узла к амплитуде пучности:

$$x_{20}^{\text{уст}} / x_{10}^{\text{уст}} = TK\Omega, \qquad (5)$$

которое линейно зависит от угловой скорости основания, что подтверждается результатами экспериментов (рис. 4). Из формулы (5) следует равенство амплитуд колебаний узла и пучности ($x_{20}^{\text{уст}} = x_{10}^{\text{уст}}$) при угловой скорости $\Omega = \Omega_{\max}$, определяемой из соотношения (4).

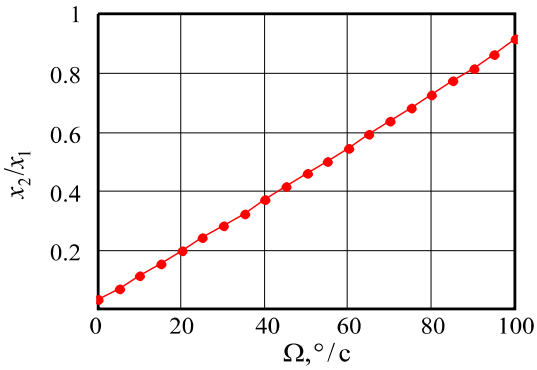


Рис. 4. Экспериментальная зависимость отношения амплитуд узла к пучности от угловой скорости основания

Структурная схема ВТГ по огибающим колебаний резонатора. Структурная схема ВТГ приведена на рис. 5 и соответствует случаю постоянной угловой скорости основания и резонансной настройке. Ветвь *ab* позволяет объяснить нелинейную зависимость амплитуд колебаний пучности и узла от угловой скорости основания. Кроме того, структурная схема на рис. 5 позволяет выполнять синтез контура компенсации кориолисова ускорения путем выбора вида и параметров корректирующего звена $W_p(s)$

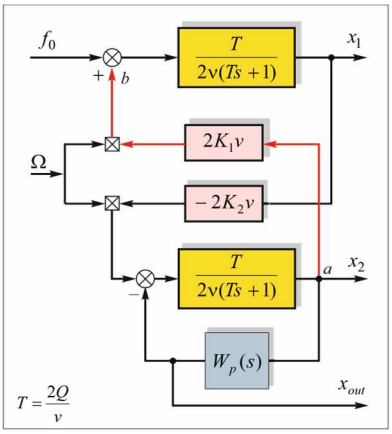


Рис. 5. Структурная схема КВГ для огибающих первичных и вторичных колебаний резонатора

Передаточная функция по выходному сигналу ВТГ с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором, наиболее часто используемому в контуре компенсации, имеет вид:

$$W_{out}(s)=\frac{x_{out}(s)}{\Omega(s)}=\frac{f_0K_2T^2k_i(T_ps+1)}{(Ts+1)[2\nu s(Ts+1)+Tk_i(T_ps+1)]+2\nu n\Omega^2 s}, \qquad (6)$$

где $T_p=k_p/k_i$ – постоянная времени; k_p, k_i – коэффициенты передачи пропорциональной и интегральной части ПИ-регулятора.

Форма передаточной функции (6) теоретически обосновывает применение ПИ-регулятора в контуре компенсации, позволяющего устранить нелинейную зависимость выходного сигнала ВТГ от угловой скорости основания в установившемся режиме, в виду того что сомножителем коэффициента нелинейности *n* является оператор Лапласа *s*.

Показано [5], что при синтезе ВТГ с точки зрения качества переходной характеристики целесообразно принимать $T_p\approx T$. В этом случае передаточная функция ВТГ с обратной связью может быть приближенно представлена в виде:

$$W_{out}(s)=\frac{x_{out}(s)}{\Omega(s)}\approx\frac{f_0K_2T}{T_cs+1}, \qquad (7)$$

где $T_c=2\nu/Tk_i$ – постоянная времени ВТГ с контуром компенсации кориолисова ускорения.

По передаточной функции (7) могут быть получены оценки времени переходного процесса и полосы пропускания ВТГ с контуром компенсации кориолисова ускорения.

Волновой твердотельный гироскоп в режиме датчика угла. Использование ВТГ на подвижных объектах различного времени функционирования открывает перспективу его использования в режиме «свободной волны» (выбега). Понятно, что продолжительность функционирования такого гироскопа определяется добротностью резонатора, от которой зависит время затухания колебаний.

Для анализа затуханий колебаний испытывался ВТГ с металлическим резонатором производства Мичуринского завода «Прогресс». Резонатор возбуждался от генератора частоты с различной амплитудой. Резонансный режим достигался, когда сдвиг фаз между сигналом генератора и сигналом в пучности достигал – 90°. При нормальных условиях собственная частота резонатора составила 5941,5 Гц. Затем генератор отключался, и анализировались переходные процессы резонатора. На рис. 6 приведен график переходного процесса при амплитуде возбуждающего напряжения 0,5 В. В этом случае амплитуда вынужденных колебаний составила 0,576 В (отношение амплитуд 1,152 (1,23 дб)).

На рис. 6 показана для примера полоса с границами ± 0,2 В, когда можно считать, что сигнал информативен и может быть выделен на фоне шума. Интервал времени входа в эту границу составляет 1,9 с.

Огибающая затухающих колебаний описывается соотношением:

$$U_{вых}(\mathrm{t}) = U_0 e^{-\frac{t}{T}}, \tag{8}$$

где U_0 – амплитуда вынужденных колебаний в момент «отпускания» волны.

Если принять, что переходный процесс затухает за время равное 3*T*, то для данного резонатора оно составляет ≈ 4,8 с. Соответственно интервал времени входа в указанную выше границу составляет всего 1,7 с, который может быть расширен путем увеличения амплитуды возбуждающего напряжения.

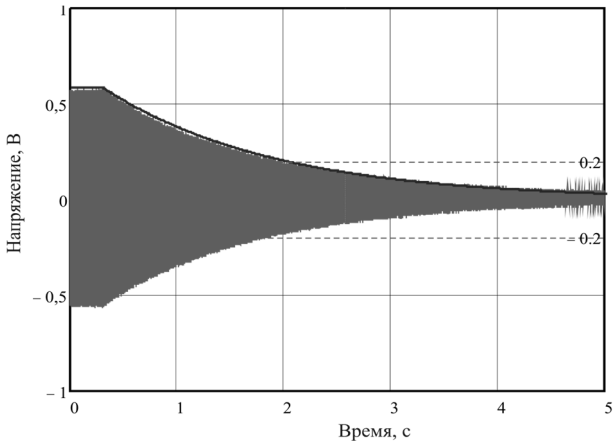


Рис. 6. Экспериментальный график затухающих колебаний резонатора при возбуждении пьезоэлементов амплитудой 0,5 В

На рис. 7 приведены графики огибающих при амплитудах возбуждающего напряжения 0,5 В, 1 В, 1,5 В, 2 В соответственно.

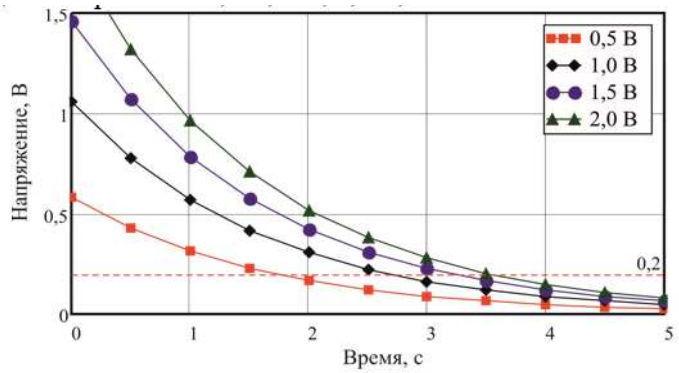


Рис. 7. Экспериментальные огибающие переходных процессов при различной амплитуде возбуждения

Из рис. 7 следует, что при амплитуде возбуждающего напряжения 2 В момент входа в границу 0,2 В составляет 3,5 с.

При анализе процессов возбуждения ВТГ был установлен факт снижения коэффициента передачи, характеризующего отношения амплитуды колебаний в пучности от амплитуды возбуждения (рис. 8).

Из рис. 8 следует, что при амплитуде возбуждающего напряжения 3,5 В амплитуда в пучности составит всего 2,64 В, что говорит о нелинейном характере процессов возбуждения в системе металлический резонатор - пьезоэлементы.

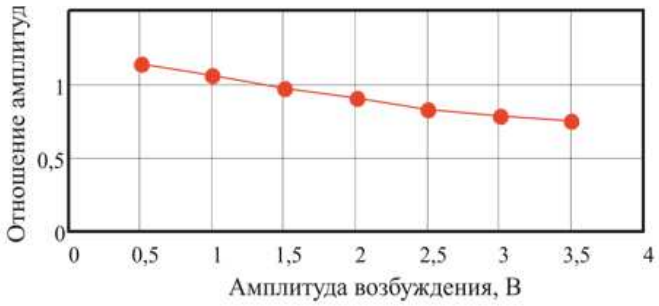


Рис. 8. Изменение коэффициента передачи ВТГ от амплитуды возбуждения

Также было установлено, что после возбуждения резонатора и отключения генератора, происходит переход колебательной картины от «электрических осей» к физическим. Это сопровождается возрастанием сигнала в узлах в момент отключения генератора. Соответственно функционирование ВТГ в качестве датчика угла в моменты перехода волновой картины к физическим осям будет сопровождаться значительными погрешностями, поэтому его использование на данном интервале времени не целесообразно.

Заключение. Приведены принципы построения волновых твердотельных гироскопов с металлическим резонатором. Из математической модели следует нелинейная зависимость амплитуд колебаний узла и пучности ВТГ от угловой скорости основания. Данный факт подтвержден экспериментальными исследованиями с ВТГ производства МЗП–ТулГУ Теоретически доказана и экспериментально подтверждена линейность отношения амплитуд узла к пучности в условиях резонансной настройки резонатора при работе ВТГ с разомкнутым контуром. Приведена структурная схема ВТГ для огибающих колебаний узла и пучности, позволяющая анализировать ВТГ без высокочастотной несущей колебаний резонатора. Структурная схема позволяет осуществлять синтез ВТГ с контуром компенсации кориолисова ускорения. Рассматриваются особенности динамики волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором в режиме свободной волны. Приводятся экспериментальные огибающие затухающих колебаний резонатора при возбуждении с различной амплитудой на резонансной частоте. Показано, что с увеличением амплитуды возбуждения, расширяется интервал времени достижения граничной полосы, при которой сигнал может быть выделен из шума. Установлен нелинейный характер коэффициента передачи резонатора по возбуждению.

Список литературы

1. Лунин Б.С., Матвеев В.А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология. М.: Радиотехника, 2014. 176 с.

2. Chikovani V.V., Yatsenko Yu. A., Kovalenko V.A., Scherban V.I. Digitally controlled High Accuracy Metallic Resonator CVG//Proc. Symposium Gyro Technology Stuttgart. 2006. P. 4.0 – 4.7.

3. Lynch D.D. Coriolis vibratory gyroscope. IEEE standard specification format guide and test procedure for Coriolis vibratory gyros. IEEE std.1431 annex B. P. 56–66.

4. Lynch D. Vibratory gyro analysis by the method of averaging. In: Proceedings of the 2nd St. Petersburg conference on gyroscopic technology and navigation, St. Petersburg. P. 26–34.

5. Матвеев В.В., Лихошерст В.В. Влияние перекрестной связи на динамику кориолисового вибрационного гироскопа // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 8. С. 22–29.

Матвеев Валерий Владимирович, канд. техн. наук, доцент, matweew.valery@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

SOLID-STATE WAVE GYROSCOPE WITH A METAL RESONATOR

V.V. Matveev

The features of the construction of Coriolis vibrating gyroscopes (CVG) with a metal resonator are considered. The nonlinear dependence of the oscillations of the antinode and the node of the standing wave of the resonator on the angular velocity of the base of the CVG of direct measurement is shown theoretically and experimentally. A method for generating the output signal of an open CVG is proposed, which makes it possible to expand the linear zone of the characteristic. The block diagram of the CVG for the envelopes of the node and antinode oscillations is presented, which allows analyzing the characteristics of the CVG without taking into account the high-frequency carrier of the resonator vibrations. The damping curves of the resonator oscillations are analyzed when the CVG operates in the integrating gyroscope mode.

Key words: Coriolis vibration gyroscope, antinode, node, nonlinearity, vibration envelopes.

Matveev Valery Vladimirovich, candidate of technical sciences, associate professor, matweew.valery@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 62-50

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИНТЕРЦЕПТОРНОГО РУЛЕВОГО ПРИВОДА МАЛОГАБАРИТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В.В. Лихошерст, М.Д. Рылеев

Рассмотрен принцип расчета электрооборудования интерцепторного рулевого привода для малогабаритного летательного аппарата. Приведена принципиальная схема и подход к расчету основных тяговых усилий и габаритных размеров рулевого привода.

Ключевые слова: рулевой привод, интерцептор, электромагнит.

Интерцептор (латинское interceptor – захватчик, от intercipio – перехватываю, отбиваю, пересекаю) – аэродинамический орган управления летательным аппаратом, выполненный в виде пластины, в рабочем положении выступающей над его поверхностью под углом к набегающему потоку. Управляющая сила при использовании интерцептора создаётся за счёт повышения давления перед ним. По конструктивному выполнению различают два основных типа интерцепторов: поворотный – аэродинамическая поверхность, поворачиваемая по отношению к потоку на углы до 90°, и выдвижной – в виде пластины, выдвигаемой из поверхности летательного аппарата в поток под углом, близким к 90°. В не отклонённом положении интерцептор обычно не выступает за обводы

поверхности летательного аппарата. Недостатками интерцепторов являются: увеличение лобового сопротивления, малая эффективность при малых углах отклонения и падение эффективности при больших углах атаки [1].

На основании изложенного применение интерцептора в качестве основного элемента рулевого привода для малогабаритных летательных аппаратов представляется интересной задачей, решение которой позволяет исключить из конструкции летательного аппарата такой конструктивный узел как механизм раскрытия аэродинамических рулей. При этом необходимо оценить возможности размещения (габаритные размеры) и энергетические параметры (потребляемый ток), т.е. провести анализ целесообразности использования интрецепторного рулевого привода в составе малогабаритного летательного аппарата (ЛА).

Для проведения оценочных расчетов рассмотрим основные конструктивные элементы одноканального интерцепторного рулевого привода, представленные на рис. 1.

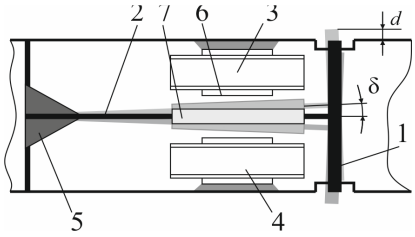


Рис. 1. Эскиз конструкции рулевого привода: 1 – интерцептор; 2 – пружина; 3, 4 – электромагниты; 5 – консольная заделка; 6 – вставки ограничители перемещения; 7 – якорь; δ – угол отклонения пружины; d – высота выдвижения интерцептора

Приведенное конструктивное исполнение привода состоит из аэродинамической поверхности 1, которая в нейтральном положении не выступает за внешние обводы корпуса ЛА. Аэродинамические силы создаются при перемещении части элемента 1 за границы корпуса под действием электромагнитных сил на якорь 7 со стороны электромагнитов 3 и 4. Для предотвращения контакта якоря 7 с полюсными наконечниками электромагнитов служат вставки 6. Якорь 7 размещен на пружине 2, выполняющей роль аккумулятора энергии – ускоряет процесс переброса интерцептора из одного крайнего положения в другое. Изменение жесткости пружины возможно за счет перемещения элементов консольной заделки 5.

Рассматриваемая конструкция (рис. 1) имеет возможность функционировать только в релейном режиме – имеет только два устойчивых положения – прижатие к вставкам 6 электромагнитов 3 или 4.

Необходимая величина тягового усилия, развиваемого электромагнитом, будет определяться двумя составляющими: силой упругости пружины и приведенной к оси электромагнита аэродинамической нагрузки.

Таким образом, основные искомые параметры – габарит и потребляемый ток будут определяться в большинстве своем непосредственно характеристиками электромагнитов 3 и 4.

Для предварительного расчета параметров электромагнитов рассмотрим момент времени, когда якорь прижат к одному из электромагнитов, что позволяет, не учитывая ускорения деталей интерцептора во время движения летательного аппарата, произвести расчет необходимого для деформирования пружины усилия. На рис. 2 представлены деформированная пружина и эскиз её с основными конструктивными параметрами.

Выражение, определяющее деформацию пружины (рис. 2, а) согласно [2] имеет вид:

$$F = 4\frac{l^3 P}{bc^3 E} = \frac{2l^2[\sigma_{из}]}{3cE},$$

где l – длина до точки приложения усилия; c – толщина пружины; b – ширина пружины; E – модуль упругости; P – допустимая нагрузка; $[\sigma_{из}]$ – допустимое напряжение при изгибе.

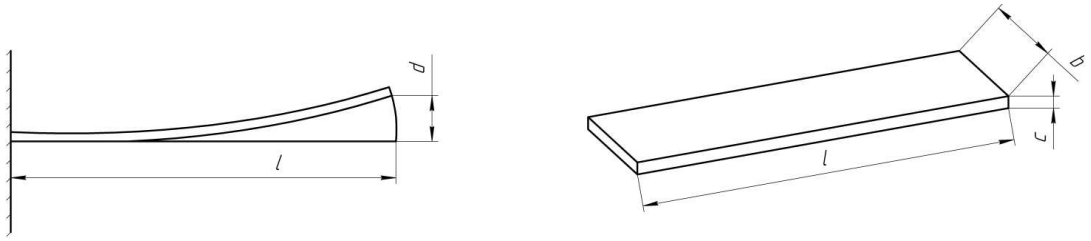


Рис. 2. Эскиз пружины: а – деформированное состояние, б – размеры конструктивного элемента пружинной ленты

При этом нагрузка на пружину будет определяться выражением [2]:

$$P = \frac{FEbc^3}{4l^3},$$

где P – нагрузка на пружину, Н; F – деформация пружины, мм; b – ширина пружины, мм; c – толщина пружины, мм; l – длина пружины, мм; E – модуль упругости.

Отношение деформации к усилию определяет жесткость пружины:

$$G = \frac{Ebc^3}{4 \cdot l^3}. \quad (1)$$

Произведение жесткости на перемещение позволяет определить силу упругости, преодоление которой необходимо обеспечить электромагнитным приводом.

По конструктивным соображениям и согласно сортаменту на пружинную ленту в качестве материала пружины целесообразно использовать стать марки 65-ТШ-С-Н-0,80×10 ГОСТ 2284-79, модуль упругости которой E ≈ 210000 МПа. Зададимся толщиной пружины c = 0,8 мм, а ширину примем равной половине выбранной марки b = 5 мм.

Для получения предварительного решения зададимся амплитудой перемещения якоря в сечении осей электромагнитов равной максимальному перемещению интерцептора. Рассмотрим задачу при d = 1 мм, считая, что такого перемещения достаточно для создания необходимой величины аэродинамической силы для совершения маневра ЛА (рис. 3).

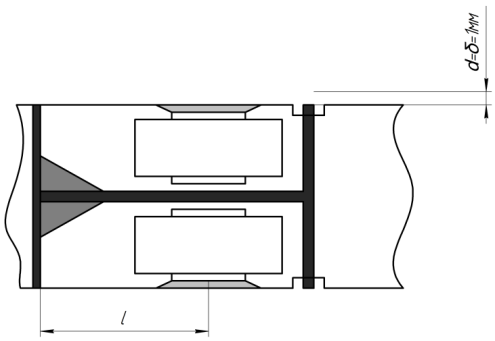


Рис. 3. Указание расчетных размеров на эскизе рулевого привода

Так как для изгиба пружины используются электромагниты, то длину пружины принимаем равной расстоянию от точки заделки до средней линии сердечников электромагнитов. Положим, l = 30 мм.

Исходя из приведенных данных сила упругости будет определяться величиной:

$$F_y = G \cdot d = \frac{Ebc^3 d}{4 \cdot l^3}, \quad F_y = \frac{210000 \cdot 5 \cdot 0{,}8^3 \cdot 1}{4 \cdot 30^3} = 0{,}497 \text{ Н}.$$

Считая, что, площадь на которую воздействует поток составляет 10 мм^2 рассчитаем максимальную силу от набегающего потока воздуха по выражению [3]

$$F_a = c_x S \frac{\rho \cdot V^2}{2}, \quad (2)$$

где c_x – коэффициент лобового сопротивления; S – площадь поверхности направленной под углом 90° к направлению потока [м^2]; ρ – плотность газовой среды [кг/м^3]; V – скорость набегающего потока [м/с].

Исходные данные для расчета: c_x = 1 – ввиду того, что интерцептор в рассматриваемом случае представляет собой плоскую прямоугольную пластину, расположенную к потоку под углом 90°; ρ = 1,225 кг/м^3, для воздуха при температуре 20°С; V = 300 м/с.

В результате расчета получим:

$$F_a = 1 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \frac{1{,}225 \cdot 300^2}{2} \approx 1 \text{ Н}.$$

Таким образом, сила упругости пружины будет составлять порядка 50 % от аэродинамической силы.

При дальнейшем расчете необходимое тяговое усилие электромагнита будем рассчитывать, как сумму аэродинамической силы и силы упругости и для учета дополнительных нагрузок на электромагниты введем коэффициент n, позволяющий учесть дополнительные силы, приведенные к оси действия электромагнитной силы – коэффициент запаса n = 1,3. В результате необходимое тяговое усилие электромагнита будет иметь величину:

$$F_{ЭМ} \approx 2 \text{ Н}.$$

Тяговое усилие, развиваемое электромагнитом магнитом, вычислим по формуле, полученной на основе баланса энергии (энергетическая формула). В условиях равномерного распределения индукции в рабочем зазоре эта формула преобразуется в формулу Максвелла [4]

$$F_{ЭМ} = \frac{B_\delta^2 S}{\mu_0},$$

где B_δ – индукция в воздушном зазоре, Тл; S – площадь полюсного наконечника, м^2; μ_0 – 1,256·10^{-6} Гн/м - магнитная проницаемость воздуха.

В качестве сердечника при расчетах будем использовать набранный из листов по 0,5мм магнитопровод из стали марки Э330А ГОСТ 12119.0-98. Поперечное сечение сердечника квадратное с размером стороны l = 5 мм.

В этом случае площадь поперечного сечения составит

$$S = l^2 = 0{,}0025 \text{ м}^2.$$

При данной площади поперечного сечении индукция в зазоре составит:

$$B_\delta = \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot F_{ЭМ}}{S}} = \sqrt{\frac{1.256 \cdot 10^{-6} \cdot 6{,}46}{0{,}0025}} = 0{,}0317 \text{ Тл}.$$

Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре:

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{0{,}0569}{1{,}256 \cdot 10^{-6}} = 25238{,}85 \text{ А/м}.$$

Требуемая магнитодвижущая сила (МДС) в обмотке:

$$F_{МДС} = 2 \cdot k \cdot H_\delta \cdot \delta,$$

где $F_{МДС}$ – МДС обмотки; k – коэффициент падения МДС в сердечнике (k = 1,03); δ – ход якоря (применительно к рассматриваемому случаю δ = 0,001 м).

$$F_{МДС} = 2 \cdot 1{,}03 \cdot 25238{,}85 \cdot 0{,}001 = 51{,}99 \text{ Н}.$$

Для расчета параметров катушки используем формулу:

$$F_{МДС} = W \cdot I,$$

где I - ток в обмотке, А; W – количество витков обмотки.

Таким образом, получить необходимую МДС можно разными соотношениями количества витков от проходящего по ним тока. Выбираем провод ПЭВ-1; сечением 0,0708 мм^2, диаметром провода по меди 0,3 мм, диаметром провода с изоляцией 0,34 мм, допустимым током 0,143 А. В виду того, что протекание тока по обмотке будет происходить импульсно в релейном режиме допустимо превышение амплитуды тока в 1,5 раза в этом случае:

$$W = \frac{F_{МДС}}{I} = \frac{51{,}99}{0{,}22} = 242 \text{ витка}.$$

Для расчета габаритных размеров центрального стержня магнитопровода примем:

толщина изоляции магнитопровода – 0,5 мм;

расстояние от края стержня до начала обмотки – 1 мм;

количество рядов обмотки – 14.

Потребная высота магнитопровода будет определяться: двумя отступами от края магнитопровода до начала обмотки и диаметром провода с изоляцией при заданном количестве рядов:

$$h_{МП} = 1 \cdot 2 + 0{,}34 \cdot 14 = 6{,}7 \text{ мм}.$$

Исходя из потребного количества витков и выбранного числа рядов обмотки рассчитаем количество слоев обмоточного провода:

$$k_c = \frac{W}{k_p} = \frac{242}{14} = 18 \text{ слоев}.$$

где k_c – количество слоев провода; k_p – количество рядов провода.

Ширина конструкции электромагнита определяется: размерами магнитопровода в плоскости, толщиной изоляции магнитопровода и диаметром обмоточного провода в изоляции с учетом количества слоев обмотки, и на два, так как провода учитываются с двух сторон.

Исходя из этого ширина электромагнита магнита равна:

$$b_{ЭМП} = 5 + 0{,}5 + 2 \cdot 0{,}34 \cdot 18 = 17{,}3 \text{ мм}.$$

На основании проведенных предварительных расчетов габаритные размеры рулевого привода будут определяться:

в длину – длиной пружины 2 и длиной вылета пружины с пластиной интерцептора (минимальная величина составляет половину ширины электромагнита);

в ширину – шириной электромагнитов;

в высоту – удвоенной высотой электромагнита с учетом двойного хода интерцептора и толщины пружины.

Габаритные размеры механической части рулевого привода (Д×Ш×В) составят: 39×17,3×16,2 мм.

При размещении рулевого привода в цилиндрической части ЛА минимальный диаметр, необходимый для размещения составит 23 мм при длине 39 мм. Исходя из полученных габаритных размеров рассмотренный электромагнитный интерцепторный рулевой привод может быть использован в составе малогабаритного ЛА. Следующим этапом работы является анализ динамики привода и проработка структуры и состава блока электроники управления.

Список литературы

1. Авиация: энциклопедия / Гл. ред. Г.П. Свищёв; Центр. аэрогидродинам. ин-т им. Н.Е. Жуковского. М.: Науч. изд-во «Большая Российская энциклопедия», 1994. 735 с.

2. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя; под ред. И.Н. Жестковой. М.: Машиностроение. 2001. 864 с.

3. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. М.: Изд-во «Машиностроение», 1965. 540 с.

4. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 книгах. Книга 2. Электричество и магнетизм. Учебное пособие для втузов. М.: АСТ, Астрель, 2008. 336 с.

Лихошерст Владимир Владимирович, канд. техн. наук, доцент, lvv_01@inbox.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Рылеев Михаил Дмитриевич, студент, tgupu@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC INTERCEPTOR STEERING GEAR FOR SMALL AIRCRAFT

V.V. Likhosherst, M.D. Ryleev

The principle of calculating the electrical equipment of the interceptor steering gear for a small-sized aircraft is considered. The schematic diagram and approach to the calculation of the main tractive effort and overall dimensions of the steering drive are presented.

Key words: steering gear, spoiler, electromagnet.

Likhosherst Vladimir Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, lvv_01@inbox.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Ryleev Mikhail Dmitrievich, student, tgupu@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 51-74

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ НАЧАЛЬНОЙ ВЫСТАВКИ БИНС НА ПОДВИЖНОМ ОБЪЕКТЕ

О.С. Балабаев, А.В. Прохорцов

Осуществлён сравнительный анализ бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС), устанавливаемых на подвижный объект с возможностью начальной выставки в динамических условиях. Произведено сравнение и выбор оптимального метода начальной выставки БИНС и составлена их классификация.

Ключевые слова: бесплатформенная инерциальная навигационная система, подвижный объект, беспилотный летательный аппарат, метод трансферной выставки.

Широкое применение инерциальных систем навигации в различных видах летательных аппаратов привело к возникновению потребности проводить начальную выставку на подвижном основании. Повышение требований к этим характеристикам связано, в частности, с разработкой беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и различных систем вооружения.

Актуальность данной задачи обусловлена необходимостью повышения точности навигации БПЛА, запускаемого с борта носителя. Ошибки в определении навигационных параметров БПЛА, как правило, складываются из трех составляющих: методической погрешностью навигационного алгоритма, инструментальными ошибками инерциальных датчиков и погрешностью определения начального положения БПЛА. Выбор и разработка оптимального метода начальной выставки позволяет полностью или частично скомпенсировать последние две составляющие [1].

На этапе начальной выставки БИНС, прежде всего, решаются две следующие задачи: определение начальных значений скорости и координат местоположения БПЛА и определение ориентации измерительных осей акселерометров [2].

Для решения данной задачи был выполнен сравнительный анализ существующих методов и составлена их классификация. На рис. 1 видно, что есть два основных способа начальной выставки БИНС: автономная выставка и выставка с привлечением сторонних источников информации (магнитометров, систем спутниковой навигации и др.).

Выставка БИНС с привлечением сторонних источников информации включает в свой состав множество способов (рис. 2).

Также, для выявления оптимального метода начальной выставки БИНС была составлена их сравнительная характеристика, результаты которой были внесены в табл. 1 – 3.

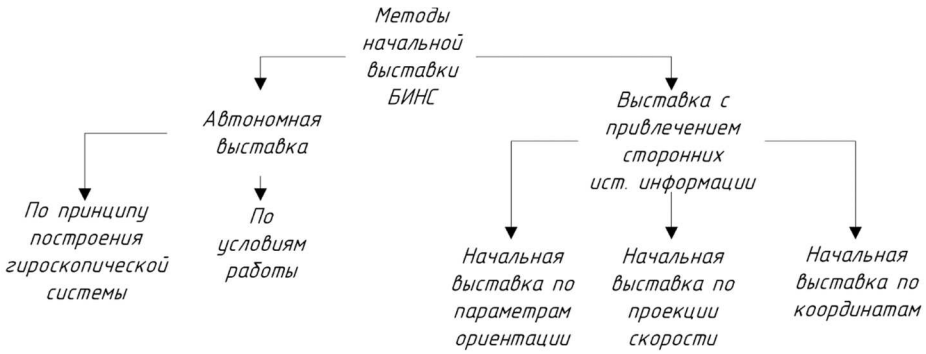


Рис. 1. Классификация методов начальной выставки БИНС

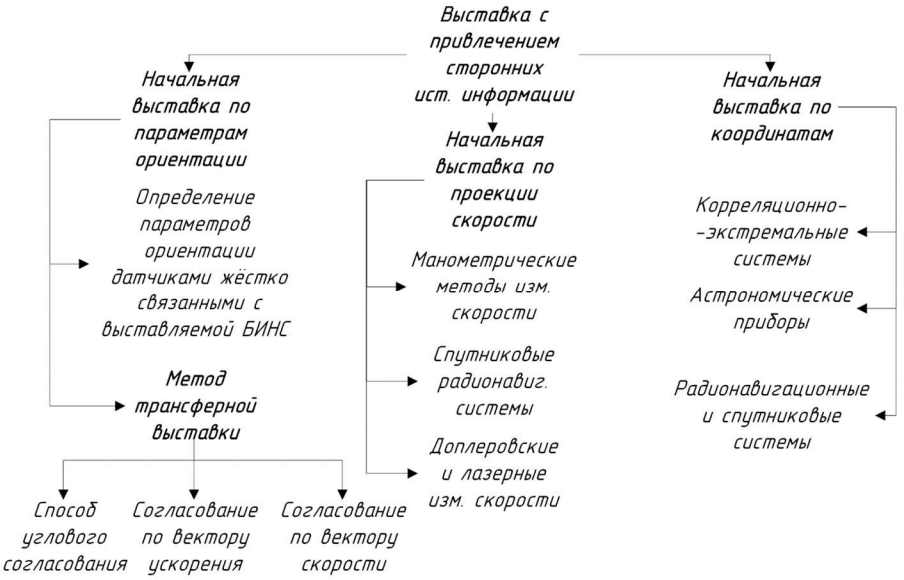


Рис. 2. Классификация методов начальной выставки БИНС с привлечением сторонних источников информации

Автономными способами начальной выставки БИНС являются способы гирокомпасирования, выполненных по разным схемам. Существует 3 способа гирокомпасирования: физическое, аналитическое и полуаналитическое.

Из табл. 1 видно, что при использовании современных датчиков угловой скорости и реализации вращения блока ЧЭ вокруг вертикальной оси наиболее перспективным подходом к начальной выставки при помощи гирокомпасов является использование именно полуаналитической схемы гирокомпасирования, так как она будет иметь наибольшую точность по сравнению с другими схемами.

Таблица 1

Преимущества и недостатки автономных методов начальной выставки БИНС

Название метода	Достоинства	Недостатки
Физическое гирокомпасирование	Сокращение времени прихода в раб. состояние за счёт возможности подстройки периода собственных колебаний (при помощи регулировки коэффициента передачи цепи коррекции)	Невозможность работы в высоких широтах в связи с ростом погрешности и угла поворота гироузла относительно рамки
Аналитическое гирокомпасирование	Простота конструкции и небольшая стоимость	Высокие требования к точности датчиков угловой скорости и акселерометров
	Возможность применения аппарата кватернионов для решения задачи ориентации, что позволяет использовать метод при любом его положении в пространстве	Увеличение стоимости системы и уменьшение точности, особенно при работе на подвижном основании
Полуаналитическое гирокомпасирование	Устранение влияния на точность погрешностей смещения нуля и коэффициента передачи	Используется вращение блока ЧЭ вокруг вертикальной оси, усложнение конструкции
	Более низкие требования к характеристикам ЧЭ	Метод требует достаточно большого времени для определения азимута
	Возможность калибровки ЧЭ в процессе работы и повышение точности измерения угла азимута	Чувствительность к динамическим погрешностям ДУС, в частности, к фазовому запаздыванию

Рассмотрим методы начальной выставки БИНС с привлечением сторонних источников информации. В табл. 2 видно, что спутниковые навигационные системы и акселерометры подходят для коррекции БИНС в большей степени, чем остальные источники навигационной информации. Это обуславливается высокой точностью измерений координат, скорости и параметров ориентации объекта.

Таблица 2

Преимущества и недостатки методов начальной выставки БИНС с привлечением сторонних источников информации

Название метода	Достоинства	Недостатки
Спутниковые радионавигационные системы [5-24]	Малое время готовности	Большое количество оборудования для приёма и обработки сигналов СРНС (2 антенны и вычислитель)
	Низкая стоимость по сравнению с инерциальными системами такого же класса точности	Увеличение точности измерений за счёт габаритов аппаратуры
	Высокая точность измерений координат	Ограниченная зона покрытия и приверженность помехам

Окончание таблицы 2

Название метода	Достоинства	Недостатки
Астрокомпас	Независимость точности показаний от высоты, скорости, продолжительности или местности (в том числе и в непосредственной близости к географическим и магнитным полюсам Земли)	Сложность и громоздкость аппаратуры
		Возможность применения только при условии видимости навигационных светил
Магнитный компас	Обеспечение необходимой точности определения положения по курсу	Требуются дополнительные приборы
	Простота устройства и автономность, небольшие габариты	Необходимость решения задач компенсации влияния магнитных возмущений и статической фильтрации случайных помех
Корреляционно-экстремальные системы	Возможность сокращения минимально необходимого состава измерителей, требуемых для функционирования	Необходимо наличие цифровых карт полей и вычислительные мощности
		Зависимость характеристик полей от фактора времени, местности и погоды
Доплеровские и лазерные измерители скорости	Обеспечивают точность	Такие приборы являются источником электромагнитного излучения, что позволяет его обнаружить
		Требуется наличие на корпусе выходных и входных отверстий
Манометрические методы измерения скорости	Автономность	Оказывают влияние на аэродинамику и испытывают влияние погодных условий

Таблица 3

Преимущества и недостатки трансферных методов начальной выставки БИНС

Название метода	Достоинства	Недостатки
Способ углового согласования	В комбинации с другими способами начальной выставки достигает большей точности начальной выставки	Имеет ограниченное применение. Изгибные деформации носителя, погрешности установки системы, и ошибки подвески ЛА, возник. трудности выставки из-за согласования ведущей и ведомой систем
Согласование по вектору ускорения	Простота алгоритма	Измерения для алгоритма подвергаются возмущениям, так как инерциальные датчики устанавливаются на борту БПЛА
Согласование по вектору скорости	В процессе интегрирования показаний акселерометра проявляется эффект сглаживания	Необходимо иметь мат.модель ошибок БИНС
		Необходимо иметь априорную статистическую информацию об имеющихся в системе помехах и возмущениях
		Для применения данного способа требуется совершение носителем манёвра типа «змейка»

Помимо этого, начальная выставка в рамках решаемой задачи может быть достигнута привлечением вспомогательной информации от навигационной системы носителя. В зарубежной литературе имеет название transferalignment (трансферная выставка) [3, 4]. Согласно выше представленной классификации данный метод является основой для методов углового согласования, согласования по вектору ускорения и согласования по вектору скорости.

Таким образом, сравнительный анализ различных методов начальной выставки БИНС на подвижном объекте по критерию эффективности, учитывающему требования по точности и информационной автономности при обеспечении высоких

эксплуатационных характеристик(надёжности, времени готовности при запуске из холодного состояния, возможности ремонта) показал [25, 26], что для систем навигации ПО целесообразнее использовать интегрированную навигационную систему состоящую из БИНС, показания которой корректируют от СРНС и БИНС, установленной на БПЛА, по координатам, линейной скорости и по параметрам ориентации.

Список литературы

1. Зарипов А.Н. Алгоритм начальной выставки бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата. 2017. 97 с.

2. Липтон А. Выставка инерциальных систем на подвижном основании/ А. Липтон; пер. с англ. Л.Г. Клибанова. М.: Наука, 1971. 167 с.

3. Веремеенко К.К., Савельев В.М. Выставка бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата в полете // Известия РАН. Теория и системы управления. 2013. №1. С. 111-121.

4. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем; под общ. ред. В.Я. Распопова. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор»», 2009. 280 с.

5. Патент 2338160 РФ С1. Способ определения параметров навигации / Богданов М.Б., Савельев В.В., Смирнов В.А., Сухинин Б.В., Прохорцов А.В., Чепурин А.А. Опубл. 10.11.2008. Бюл. №31.

6. Патент 2329469 РФ С1. Способ определения параметров навигации /Богданов М.Б., Савельев В.В., Смирнов В.А., Сухинин Б.В., Прохорцов А.В., Чепурин А.А. Опубл. 20.07.2008. Бюл. № 20.

7. Прохорцов А.В., Савельев В.В. Методы определения координат и скорости подвижных объектов с помощью спутниковых радионавигационных систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Вып. 2. С. 264-274.

8. Прохорцов А.В., Минина О.В. Аналитическое решение навигационной задачи на основе разностно – дальномерного метода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 6. С. 123-126.

9. Прохорцов А. В., Минина О. В. Аналитическое решение навигационной задачи на основе разностно-радиально-скоростного метода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 9. С. 276-279.

10. Прохорцов А.В., Савельев В.В. Основы функционирования спутниковых навигационных систем: учеб. пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 104 с.

11. Прохорцов А.В. Методы определения параметров ориентации подвижных объектов по сигналам спутниковых радио - навигационных систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 1. С. 258-267.

12. Патент на изобретение RU 2276384 С2. Способ определения угловой ориентации объекта/ Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В. Опубл. 20.08.2009. Бюл. №23.

13. Патент 2248004 РФ С2. Способ определения угловой ориентации объекта/ Блинов В.В., Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В., Сухинин Б.В. Опубл. 10.03.2005. Бюл. № 7.

14. Прохорцов А.В. Способы определения параметров ориентации подвижных объектов по сигналам спутниковых навигационных систем. Монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. 80 с.

15. Патент 2414685 РФ С1. Способ определения угловой ориентации объекта/ Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В., Власов А.Ю., Данилов М.Б. Опубл. 20.03.2011. Бюл. № 8.

16. Прохорцов А.В., Уварова Н.А.Обзор современной приемной аппаратуры СНС российского производства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 5. С. 165-170.

17. Патент 2364884 РФ С2. Способ определения угловой ориентации объекта / Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В., Сухинин Б.В. Опубл. 20.08.2009.

18. Prokhortsov A.V., Savelev V.V., Smirnov V.A. A method of orientation data correction of a strap down inertial navigation system by signals received from one satellite navigation system antenna. В сборнике: 19th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2012 - Proceedings. 19. 2012. P. 232-234.

19. Прохорцов А.В., Богданов М.Б., Савельев В.В., Сухинин Б.В. Метод определения параметров ориентации с помощью СНС, основанный на измерении координат трех его точек // Известия Тульского государственного университета. 2006. С. 309.

20. Патент 2422844 РФ С2. Способ определения угловой ориентации объекта/ Богданов М.Б., Савельев В.В., Смирнов В.А., Прохорцов А.В., Чепурин А.А., Опуб. 27.06.2011. Бюл. № 18.

21. Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В., Сухинин Б.В. Интерферометрический метод определения параметров ориентации ЛА / Полет. Общероссийский научно-технический журнал. Москва: Изд-во Машиностроение-Полет. 2007. Вып. 11. С. 45-47.

22. Прохорцов А.ВВозможности определения параметров угловой ориентации по сигналам одной антенны СНС // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 11. С. 74-79.

23. Прохорцов А.В. Метод повышения точности определения параметров ориентации путем совместной обработки сигналов БИНС и приемной аппаратуры СНС с применением одной антенны по сигналам с трех и более навигационных спутников // Известия Института инженерной физики. 2018. Вып. 3. С. 31-36.

24. Прохорцов А.В., Савельев В.В., Смирнов В.А. Способ коррекции показаний БИНС по параметрам ориентации по сигналам одной антенны СНС // XIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. 2012. С. 208-210.

25. Titterton D.H., Weston J.L. Strapdown inertial navigation technology. IEE, 2004. 581 p.

26. Савельев В.М., Антонов Д.А. Выставка бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата на подвижном основании/ // Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск №45. [Электронный ресурс] URL: https://mai.ru/upload/iblock/636/vystavka-besplatformennoy-inertsialnoy-navigatsionnoy-sistemy-bespilotnogo-letatelnogo-apparata-na-podvizhnom-osnovanii.pdf (дата обращения: 10.02.2020).

Балабаев Олег Сергеевич, аспирант, olezhkabalabaev@gmail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Прохорцов Алексей Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, proxav@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE INITIAL SINS EXHIBITION METHODS ON A MOVING OBJECT

A.V. Prokhortsov, O.S. Balabaev

A comparative analysis of strapdown inertial navigation systems (SINS) installed on a moving object with the possibility of an initial exhibition in dynamic conditions has been carried out. Comparison and selection of the optimal method of the initial SINS alignment was made and their classification was compiled.

Key words: strapdown inertial navigation system, mobile object, unmanned aerial vehicle, transfer exhibition method.

Balabaev Oleg Sergeevich, student, olezhkabalabaev@gmail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Prokhortsov Alexey Vyacheslavovich, candidate of technical sciences, docent, head of department, proxav@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 629.056.8

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ НАВИГАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ НА ОСНОВЕ ПСЕВДОДАЛЬНОМЕРНОГО МЕТОДА

А.В. Прохорцов, О.В. Минина

Навигационная задача определения пространственно-временного положения малогабаритных высокоманевренных объектов военного и гражданского назначения по сигналам спутниковой радионавигационной системы требует точного и быстрого решения, именно поэтому был предложен аналитический подход к нахождению координат подвижных объектов на основе псевдодальномерного метода, который позволил сократить время на математические преобразования.

Ключевые слова: спутниковая радионавигационная система, аналитические выражения, навигационные методы, навигационные параметры, псевдодальномерный метод.

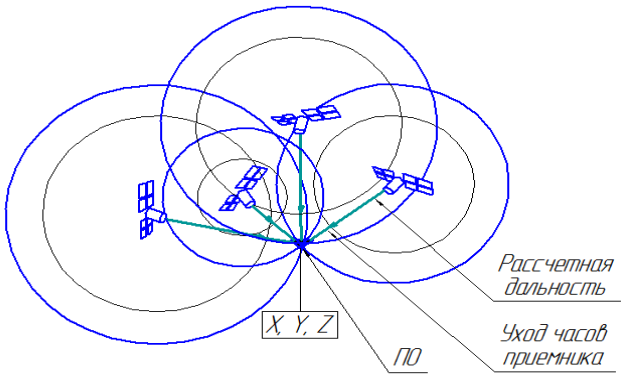
Для определения положения движущихся малогабаритных объектов военного и гражданского назначения существует необходимость разработки методов, исключающих большие временные затраты на вычислительные процессы.

В программах, установленных на устройствах приемной аппаратуры (ПА) спутниковой радионавигационной системы (СРНС), в основном применяются методы, использующие численный подход к определению пространственных координат малогабаритных подвижных объектов (ПО), которые требуют длительных вычислительных процессов и имеют невысокую точность определения местоположения, так как оценивание координат осуществляется перебором приблизительных значений широты, долготы, высоты малогабаритных ПО [1 – 3].

В условиях исходной полной неопределенности информации об объекте наиболее точным способом для первоначального определения пространственного местоположения ПО по сигналам СРНС является псевдодальномерный метод [4].

В качестве навигационного параметра в указанном методе выступает псевдодальность $D_{изм}$, поверхностью положения ПО является сфера с центром в точке центра масс навигационного спутника (НС), однако радиус этой сферы изменен на неизвестную величину D'. Для решения навигационной задачи с помощью псевдодальномерного метода необходимо производить измерения псевдодальностей до четырех НС, тогда координаты ПО могут определяться как точка пересечения четырех поверхностей сфер [5, 6]. Геометрическое представление данного метода показано на рис.

Необходимо отметить, если в геоцентрической системе координат (ГЦСК) высота ПО априорно известна, то число НС необходимых для решения навигационной задачи в части определения координат сокращается на один. Однако для этого потребуется информация о земном радиус-векторе, который является функцией широты места, в таком случае навигационную задачу можно решить с высокой точностью только путем приближений [7].



Геометрическое представление псевдодальномерного метода определения координат ПО: X, Y, Z – координаты ПО в геоцентрической системе координат

Одновременно с определением местоположения ПО псевдодальномерный метод позволяет вычислять отклонение шкалы времени ПО от НС.

Очевидно, при нахождении постоянной погрешности отклонения шкалы времени ПО от НС можно определить величину расхождения Δt, что позволит синхронизировать шкалу времени ПО с системной. Благодаря такой возможности значительно упрощается ПА СРНС, что и обусловливает преимущественное применения псевдодальномерного метода в настоящее время.

В псевдодальномерном методе под псевдодальностью от i-ого НС до ПО понимают измеренную дальность $D_{измi}$ от ПО до НС, отличающуюся от истинной дальности D_iна неизвестную, но постоянную за время определения навигационных параметров величину D'. Следовательно, псевдодальность до i-ого НС можно определить по формуле:

$$D_{\text{изм } i} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} + D', \quad (1)$$

где (x_i, y_i, z_i);(x, y, z) — известные на момент измерения координаты i-го НС и координаты ПО, определенные в ГЦСК, соответственно.

Проведя измерения псевдодальностей до четырех НС, можно составить систему из четырех уравнений (1) с четырьмя неизвестными (x, y, z, D'), которая имеет единственное точное решение. В связи с этим было предложено решение данной системы методом Гаусса и получены аналитические выражения для определения координат ПО.

После преобразований координаты ПО определяются по следующим формулам

$$x = \frac{a_1 f_1 g_1 n_1 - (y_2 - y_1) g_1 u_1 - (z_2 - z_1) s_1 f_1 - (D_{\text{изм1}} - D_{\text{изм2}}) p_1 f_1 g_1}{(x_2 - x_1) g_1 f_1 n_1 + (y_2 - y_1) w_1 g_1 + (z_2 - z_1) t_1 f_1 - (D_{\text{изм1}} - D_{\text{изм2}}) m_1 f_1 g_1},$$

$$y = \frac{a_1 e_2 p_2 r_2 - (x_2 - x_1) e_2 u_2 - (z_2 - z_1) p_2 s_2 - (D_{\text{изм1}} - D_{\text{изм2}}) p_2 e_2 q_2}{(x_2 - x_1) w_2 e_2 + (y_2 - y_1) e_2 p_2 r_2 + (z_2 - z_1) t_2 p_2 - (D_{\text{изм1}} - D_{\text{изм2}}) e_2 k_2 p_2},$$

$$z = \frac{a_1 h_3 p_3 f_3 - (x_2 - x_1) f_3 s_3 - (y_2 - y_1) h_3 u_3 - (D_{\text{изм1}} - D_{\text{изм2}}) h_3 f_3 m_3}{(D_{\text{изм1}} - D_{\text{изм2}}) h_3 f_3 n_3 - (x_2 - x_1) f_3 t_3 - (y_2 - y_1) w_3 h_3 + (z_2 - z_1) h_3 p_3 f_3},$$

где $a = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - D_{\text{изм1}}^2; b = x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 - D_{\text{изм2}}^2; a_1 = 0{,}5(b - a);$

$c = x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 - D_{\text{изм3}}^2; d = x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 - D_{\text{изм4}}^2; b_1 = 0{,}5(c - a);$

$c_1 = 0{,}5(d - a); d_1 = 0{,}5(d - c); e_1 = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1);$

$h_1 = (D_{\text{изм1}} - D_{\text{изм2}})(y_3 - y_1) - (D_{\text{изм1}} - D_{\text{изм3}})(y_2 - y_1); t_1 = m_1 h_1 - e_1 n_1;$

$k_1 = (D_{\text{изм1}} - D_{\text{изм2}})(z_4 - z_1) - (D_{\text{изм1}} - D_{\text{изм4}})(z_2 - z_1); w_1 = m_1 k_1 - q_1 n_1;$

$m_1 = q_1 g_1 (y_4 - y_3) + e_1 f_1 (z_4 - z_3) - g_1 f_1 (x_4 - x_3);$

$n_1 = g_1 k_1 (y_4 - y_3) - f_1 h_1 (z_4 - z_3) - f_1 g_1 (D_{\text{изм3}} - D_{\text{изм4}});$

$p_1 = (y_4 - y_3) g_1 [a_1 (z_4 - z_1) - c_1 (z_2 - z_1)] + (z_4 - z_3) f_1 [a_1 (y_3 - y_1) -$

$-b_1 (y_2 - y_1)] - d_1 f_1 g_1; s_1 = n_1 [a_1 (y_3 - y_1) - b_1 (y_2 - y_1)] - h_1 p_1;$

$q_2 = (x_4 - x_3) e_2 [a_1 (z_4 - z_1) - c_1 (z_2 - z_1)] - (z_4 - z_3) p_2 [a_1 (x_3 - x_1) -$

$-b_1 (x_2 - x_1)] - d_1 p_2 e_2; s_2 = r_2 [a_1 (x_3 - x_1) - b_1 (x_2 - x_1)] - g_2 q_2;$

$k_2 = m_2 e_2 (x_4 - x_3) + f_2 p_2 (z_4 - z_3) - e_2 p_2 (y_4 - y_3); t_2 = g_2 k_2 - f_2 r_2;$

$$m_2 = (y_2 - y_1)(z_4 - z_1) - (y_4 - y_1)(z_2 - z_1); n_2 = (D_{изм1} - D_{изм2})(z_4 - z_1) - -(D_{изм1} - D_{изм4})(z_2 - z_1);\quad u_1 = n_1[a_1(z_4 - z_1) - c_1(z_2 - z_1)] - k_1 p_1;$$
$$r_2 = n_2 e_2(x_4 - x_3) + g_2 p_2(z_4 - z_3) - p_2 e_2(D_{изм3} - D_{изм4});\ w_2 = n_2 k_2 - m_2 r_2;$$
$$m_3 = (x_4 - x_3) f_3[b_1(y_4 - y_1) - c_1(y_3 - y_1)] - (y_4 - y_3) h_3[a_1(x_3 - x_1) - -b_1(x_2 - x_1)] - d_1 f_3 h_3;\quad s_3 = p_3[b_1(y_4 - y_1) - c_1(y_3 - y_1)] - q_3 m_3;$$
$$p_3 = q_3 f_3(x_4 - x_3) + g_3 h_3(y_4 - y_3) - f_3 h_3(D_{изм3} - D_{изм4}); t_3 = k_3 p_3 + n_3 q_3;$$
$$q_3 = (D_{изм1} - D_{изм3})(y_4 - y_1) - (D_{изм1} - D_{изм4})(y_3 - y_1); w_3 = e_3 p_3 + g_3 n_3;$$
$$g_1 = (z_2 - z_1)(y_3 - y_1) - (z_3 - z_1)(y_2 - y_1); q_1 = (x_2 - x_1)(z_4 - z_1) - (x_4 - -x_1)(z_2 - z_1); f_1 = (y_2 - y_1)(z_4 - z_1) - (y_4 - y_1)(z_2 - z_1);$$
$$f_2 = (y_2 - y_1)(x_3 - x_1) - (y_3 - y_1)(x_2 - x_1);$$
$$e_2 = (z_2 - z_1)(x_3 - x_1) - (z_3 - -z_1)(x_2 - x_1);$$
$$g_2 = [(D_{изм1} - D_{изм2})(x_3 - x_1) - (D_{изм1} - D_{изм3})(x_2 - x_1);$$
$$p_2 = (x_2 - x_1)(z_4 - z_1) - (x_4 - x_1)(z_2 - z_1); u_2 = r_2[a_1(z_4 - z_1) - c_1(z_2 - -z_1)] - n_2 q_2; f_3 = (y_2 - y_1)(x_3 - x_1) - (y_3 - y_1)(x_2 - x_1);$$
$$e_3 = (z_2 - z_1)(x_3 - x_1) - (z_3 - z_1)(x_2 - x_1); u_3 = p_3[a_1(x_3 - x_1) - b_1(x_2 - -x_1)] - g_3 m_3; g_3 = (D_{изм1} - D_{изм2})(x_3 - x_1) - (D_{изм1} - D_{изм3})(x_2 - x_1);$$
$$h_3 = (x_3 - x_1)(y_4 - y_1) - (x_4 - x_1)(y_3 - y_1); k_3 = (z_3 - z_1)(y_4 - y_1) - (z_4 - -z_1)(y_3 - y_1); n_3 = f_3 h_3(z_4 - z_3) - k_3 f_3(x_4 - x_3) - e_3 h_3(y_4 - y_3).$$

Для подтверждения правильности разработанных формул, было осуществлено численное моделирование в среде Mathcad, которое доказало корректность аналитического подхода к решению навигационной задачи в части определения координат ПО.

Вместе с тем, были проведены исследовательские эксперименты на основе применения геодезического GPS-оборудования для подтверждения эффективности применения аналитического способа определения пространственно-временного местоположения на основе псевдодальномерного метода, исходя из анализа результатов которых можно сделать вывод, что предложенные аналитические подходы решения навигационной задачи по сравнению с численными позволяют минимизировать время на преобразования, тем самым увеличивая быстродействие вторичной обработки в вычислительных устройствах ПА.

Таким образом, можно сделать вывод, что аналитические выражения для псевдодальномерного метода определения местоположения ПО результативнее применять в уже существующих вычислителях ПА СРНС, так как они, обеспечивая требуемую точность, сокращают время, затрачиваемое для нахождения пространственного местоположения объекта.

Список литературы

1. Прохорцов А.В., Савельев В.В. Методы определения координат и скорости подвижных объектов с помощью спутниковых радионавигационных систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Вып. 2. С. 264-274.

2. Патент 2329469 РФ С1. Способ определения параметров навигации / Богданов М.Б., Савельев В.В., Смирнов В.А., Сухинин Б.В., Прохорцов А.В., Чепурин А.А. Опубл. 20.07.2008. Бюл. №20.

3. Уварова Н.А., Прохорцов А.В. Аналитическое нахождение координат по сигналам СНС на основе дальномерного метода // Сборник докладов науч.-техн. конференции «Инновационные наукоемкие информационные технологии». Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С. 62-65.

4. Прохорцов А.В., Савельев В.В. Основы функционирования спутниковых навигационных систем: учебное пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 104 с.

5. Патент 2338160 РФ С1. Способ определения параметров навигации / Богданов М.Б., Савельев В.В., Смирнов В.А., Сухинин Б.В., Прохорцов А.В., Чепурин А.А. Опубл. 10.11.2008. Бюл. № 31.

6. Прохорцов А.В., Минина О.В. Аналитическое решение навигационной задачи на основе разностно – дальномерного метода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 6. С. 123-126.

7. Прохорцов А.В. Методы определения параметров ориентации подвижных объектов по сигналам спутниковых радио - навигационных систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 1. С. 258-267.

Прохорцов Алексей Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, proxav@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Минина Ольга Владимировна, аспирант, OL-within-sun@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYTICAL SOLUTION OF THE NAVIGATION PROBLEM BASED ON THE PSEUDODAL-DIMENSIONAL METHOD

A.V. Prokhortsov, O.V. Minina

The navigation problem of determining the space-time position of small-sized highly maneuverable military and civilian objects using signals from a satellite radio navigation system requires an accurate and fast solution, which is why an analytical approach was proposed to finding the coordinates of moving objects based on the pseudo-range method, which made it possible to reduce the time by mathematical transformations.

Key words: satellite radio navigation system, analytical expressions, navigation methods, navigation parameters, pseudo-range method.

Prokhortsov Alexey Vyacheslavovich, candidate of technical sciences, docent, head of department, proxav@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Minina Olga Vladimirovna, postgraduate, OL-within-sun@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.311

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НИЗКОГО И СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Г.Я. Вагин, А.А. Куликов, А.А. Севостьянов, Е.Н. Соснина,
Р.Ш. Бедретдинов

Ряд исследований свидетельствуют о том, что показатели качества электроэнергии в распределительных электрических сетях низкого (0,4 кВ) и среднего (6…10 кВ) напряжения выходят за допустимые нормы. Это приводит как к техническому, так и к значительному экономическому ущербу. Статья посвящена решению вопроса повышения качества электроснабжения распределительных электрических сетей. На основе собственных исследований и анализа отечественных и зарубежных работ по интеллектуализации электрических сетей предложены рекомендации по методам и средствам повышения качества электроэнергии в системах электроснабжения потребителей.

Ключевые слова: качество электроэнергии, интеллектуальные электрические сети, системы электроснабжения, самонесущие изолированные провода, реклоузер, автоматизация, тиристорные регуляторы напряжения.

Введение. Качество электроэнергии (КЭ) оказывает большое влияние на эффективность функционирования всех отраслей экономики России. Низкое КЭ может приводить к браку продукции, повреждаемости оборудования, снижению срока службы электроприемников, сбоям и ложной работе релейной защиты, автоматики и электронной техники, перегреву и перегоранию нулевых проводников, увеличению потерь электроэнергии и др.

По данным [1, 2], ежегодный ущерб от низкого КЭ в России составляет 25 млрд. долларов. Исследования [3, 4] показывают, что в распределительных электрических сетях (РЭС) низкого (0,4 кВ) и среднего (6-10 кВ) напряжения показатели качества электроэнергии также превышают допустимые по ГОСТ 32144 [5] значения. Так отклонения напряжения на шинах 0,4 кВ трансформаторных подстанций выходят за допустимые +10 % от $U_{ном}$. Коэффициенты обратной и нулевой последовательности напряжения также выходят за допустимую норму 2 %.

С каждым годом увеличивается количество нелинейных электроприемников, которые вызывают несинусоидальность токов и напряжения.

Основными причинами низкого КЭ в РЭС являются:

- большая протяженность воздушных линий электропередачи (ЛЭП) напряжением 0,4, 6, 10 кВ и высокая степень их износа;
- большая аварийность систем электроснабжения (до 100 и более отключений в год);
- низкая степень автоматизации систем электроснабжения;
- применение трансформаторов на некоторых подстанциях, со схемой соединения «звезда-звезда», вместо схемы «треугольник-звезда»;
- отсутствие средств регулирования напряжения;
- высокий уровень потерь напряжения и электрической энергии;
- отсутствие средств и приборов мониторинга КЭ в системах электроснабжения.

В данной статье на основании собственных исследований и анализа отечественных и зарубежных публикаций авторы дают рекомендации по методам и средствам, которые позволяют повышать КЭ в РЭС низкого и среднего напряжения с учетом перевода электроэнергетики России на технологии *Smart Grid* (интеллектуальные электрические сети).

Материалы и методы. Повысить КЭ в РЭС можно двумя путями: 1) схемными и 2) применением специальных средств [4, 6, 7].

Схемные пути являются наиболее простыми и экономичными. Основными из них являются следующие:

- увеличение мощности источников питания;
- параллельное включение питающих трансформаторов;
- равномерное распределение однофазных электроприемников по парам фаз трехфазной системы;
- разделение питания электроприемников чувствительных и нечувствительных к КЭ.

Наибольший эффект схемные пути дают если показатели КЭ незначительно превышают требования ГОСТ 32144.

Если не удается схемными путями повысить КЭ, то необходимо применение специальных средств. К таким средствам, применительно к РЭС, можно отнести:

- применение для ЛЭП 0,4 кВ самонесущих изолированных проводов;
- повышение напряжения распределительных сетей;
- применение реклоузеров;
- применение средств регулирования напряжения и перетоков электроэнергии;
- сооружение собственных электростанций на основе возобновляемых источников энергии.

Рассмотрим эти средства более подробно.

Применение самонесущих изолированных проводов (СИП). Существующие ЛЭП 0,4 кВ имеют низкую надежность и большое индуктивное сопротивление, что при их большой протяженности, приводит к недопустимым отклонениям напряжения на зажимах электроприемников в конце ЛЭП. Для уменьшения отклонений напряжения в таких сетях необходимо применять самонесущие изолированные провода. ЛЭП с СИП имеет следующие преимущества [8]:

- обеспечение бесперебойного электроснабжения потребителей при падении проводов на землю, падении на провода деревьев, набросах и т.п.;
- существенно меньшая пожароопасность за счет исключения искрообразований, обычно возникающих на ЛЭП при схлестывании неизолированных проводов и в сухую погоду;
- снижение сопротивлений, потерь и несимметрии напряжения;
- обеспечение большей безопасности обслуживающего персонала, населения и животных при случайном касании проводов;
- лёгкость монтажа;
- возможность подвески на одних опорах проводов разных напряжений 0,4 кВ и 6/10 кВ.

Повышение напряжения распределительных сетей. В настоящее время напряжение РЭС составляет 0,4, 6, 10 и 35 кВ. Напряжения питающих сетей 35 и 110 кВ.

Применение напряжения 6 и 10 кВ, при больших длинах распределительных сетей, вызывает высокие потери напряжения, мощности и электроэнергии.

В соответствии с технической политикой ПАО «МРСК Центра» при планировании реконструкции и строительства новых электросетевых зон, должен осуществляться переход на более высокие классы среднего напряжения (с 6 кВ на 10 кВ, с 10 кВ на 20 кВ) [9].

Переход на 20 кВ позволяет: уменьшить все виды потерь; существенно сократить число трансформаций напряжения за счет укрупнения подстанций; вдвое увеличить радиус обслуживания подстанций и сократить их количество; резко сократить расход цветного металла [10-12].

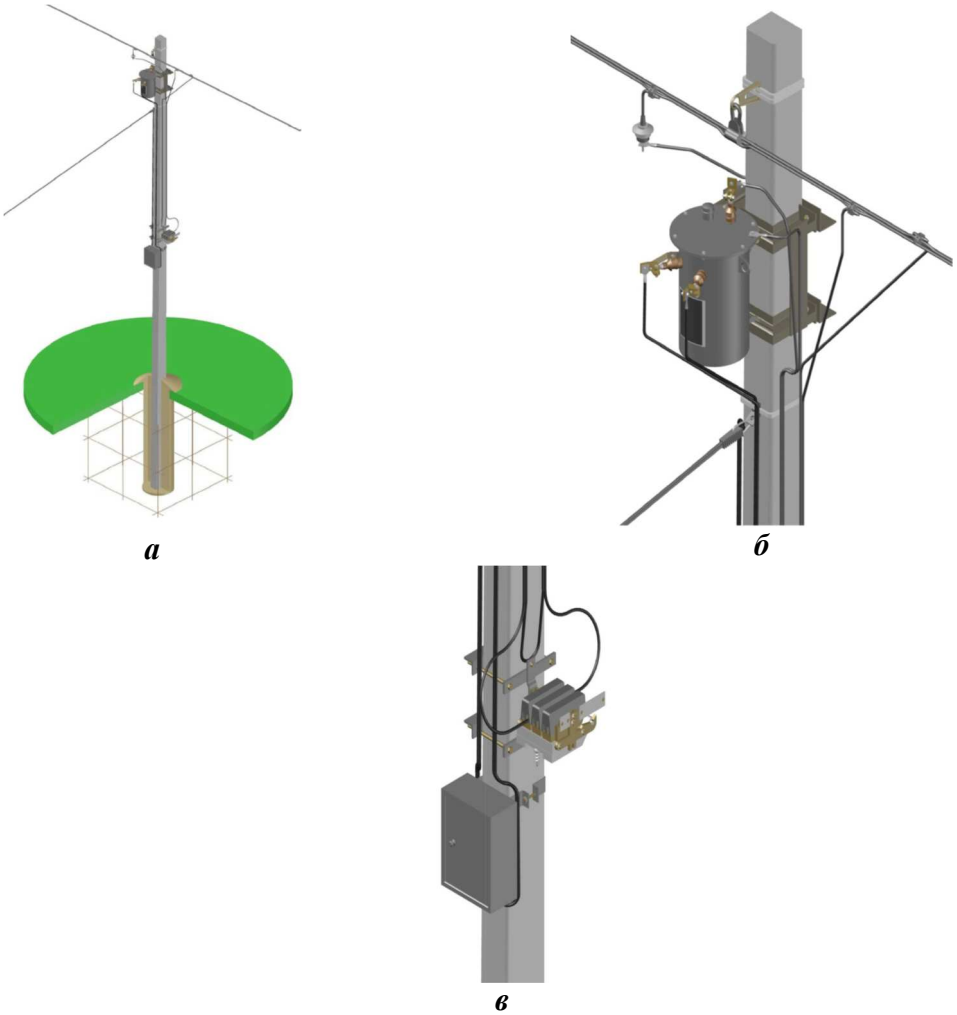
Повышение напряжения особенно перспективно в сетях напряжением до 1000 В. Основным напряжением в этих сетях является 0,4 кВ. Длина сетей 0,4 кВ около 800 тыс. км. Эти сети характеризуются наибольшими потерями напряжения, электроэнергии, несимметрией токов и напряжения.

Для устранения этих недостатков АО «НИИЦ МРСК» предложил повысить напряжение распределительных сетей до 0,95 кВ. Это предложение уже внедрено в электрических сетях г. Богородска Нижегородской области [13].

На рис.1 приведены компоновки оборудования данной сети, а на рис. 2 однолинейная схема питания потребителей с совместной подвеской сетей 0,4 кВ и 0,95 кВ.

Преимущества перевода сетей 0,4 кВ на 0,95 кВ:

- эффективная длина питающих линий 0,95 кВ увеличивается в среднем в 3 раза;
- сложность несанкционированного подключения к сети 0,95 кВ;
- адаптивность сетей 0,95 кВ к росту нагрузки;
- обеспечение нормированного уровня отклонения напряжения у удаленных потребителей;
- нормативные требования к проектированию, строительству и эксплуатации сетей 0,4 кВ применимы к сетям 0,95 кВ;
- возможность выполнения совместной подвески сетей 0,4 кВ и 0,95 кВ без изменения габаритов воздушной линии;
- повышение надежности электроснабжения потребителей;
- сокращение технических потерь на 5-10 % и коммерческих потерь на 30 %.



а ***б*** ***в***

Рис. 1. Компоновка оборудования индивидуальной подстанции: а – общий вид опоры с индивидуальным однофазным трансформатором 0,55/0,23 кВ и навесным оборудованием; б – установка на опоре индивидуального однофазного трансформатора и ограничителя перенапряжения; в – установка на опоре разъединителя с предохранителями и шкафа учета электроэнергии

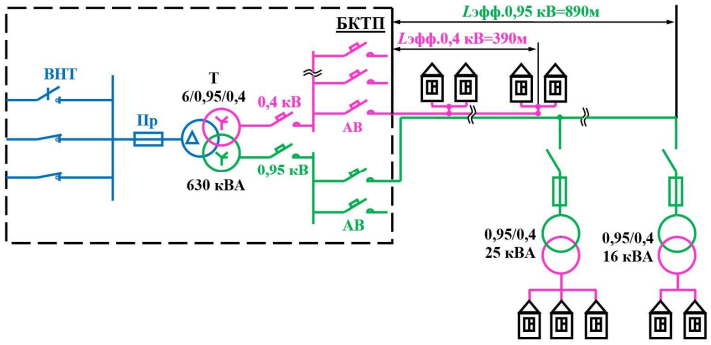


Рис. 2. Вариант применения индивидуальных ТП 0,55/0,23 кВ и 0,95/0,4 кВ с совместной подвеской сетей 0,4 кВ и 0,95 кВ: ВНТ – выключатель нагрузки 6 кВ; Пр – предохранитель 6 кВ; Т – силовой трехобмоточный трансформатор 6/0,95/0,4 кВ мощностью 630 кВА; АВ – автоматический выключатель; БКТП – блочная комплектная трансформаторная подстанция

Применение реклоузеров. Согласно стандарту *IEEE C*37/60-2003 [14] под реклоузером понимается автономное устройство, выполняющее функции коммутационного аппарата и релейной защиты и автоматики (РЗиА). Реклоузер нашел применение в распределительных электрических сетях (РЭС) с воздушными линиями электропередачи в качестве автоматического пункта секционирования сетей с одним или несколькими источниками питания. Также реклоузер может использоваться как высоковольтная ячейка отходящей линии, например, в случае присоединения новых электропотребителей.

Реклоузер *PBA/TEL* конструктивно состоит из трех основных блоков (коммутационный модуль, система измерения, шкаф управления), которые интегрированы в одно интеллектуальное многофункциональное устройство. В качестве коммутационного модуля (рис. 3) используется силовой вакуумный выключатель, который необходим для отключения токов короткого замыкания и оперативных переключений (реконфигурации РЭС). Система измерения состоит из встроенных датчиков напряжения и тока. Управление коммутационным модулем и РЗиА выполняется шкафом управления [15]. С точки зрения автоматики реклоузер реализует функции автоматического повторного включения (АПВ), автоматического ввода резерва (АВР) и автоматической частотной разгрузки (АЧР). Релейная защита реклоузера является направленной и позволяет реализовать токовые защиты от межфазных и однофазных коротких замыканий, защиту минимального напряжения.



Рис. 3. Внешний вид коммутационного модуля реклоузера

Визуализация сети, передача оперативной информации о режимах работы и состоянии реклоузера возможно за счет его интеграции в *SCADA* или *DMS*-систему. В качестве протоколов передачи данных *PBA/TEL* использует *Modbus*, *DNP*3, *IEC* 60870-104. Для передачи информации по другому протоколу в шкафу управления реклоузера предусмотрен специальный ретранслятор протоколов (конвертер).

PBA/TEL может передавать информацию как по проводным (ВОЛС, *RS*232/485), так и по беспроводным каналам связи (*GSM*, радиосвязь).

Связь реклоузера в *SCADA* или *DMS*-системах может быть организована двумя способами – с помощью прямого управления и через устройство сбора и передачи данных.

Вариант прямого управления предполагает реализацию связи с диспетчером непосредственно от шкафа управления реклоузера. Такой вариант организации связи предусматривает установку в шкафу управления передающего устройства, в качестве которого могут выступать радио- и *GSM*-модемы, опторазвязки. Аналогичные устройства должны быть размещены и на диспетчерском пункте. При таком варианте организации связи *SCADA* или *DMS*-система персонально обращается к каждому реклоузеру.

Связь с реклоузером может осуществляться через промежуточное устройство сбора и передачи данных (УСПД). В этом случае *SCADA* или *DMS*-система взаимодействует с УСПД, которое получает информацию с реклоузеров

Применение средств регулирования напряжения и перетоков электроэнергии. Все понижающие подстанции 10(6)/0,4 кВ в распределительных сетях не имеют автоматического регулирования напряжения. Они имеют переключатель без возбуждения (ПБВ), которым пользуются только 2 раза в году.

Поэтому для целей регулирования напряжения в распределительных сетях 6-20 кВ весьма перспективно использовать тиристорные регуляторы напряжения (ТРН). Такие регуляторы напряжения разработаны на кафедре «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» НГТУ им. Р.Е. Алексеева [16-18].

ТРН выполняет функции автоматического регулирования напряжения и мощности в РЭС. Применение ТРН обеспечивает снижение электрических потерь и повышение пропускной способности линий электропередачи Отличительной особенностью ТРН является высокое быстродействие и точность регулирования. На рис. 4 показана принципиальная схема силовой части ТРН [19, 20].

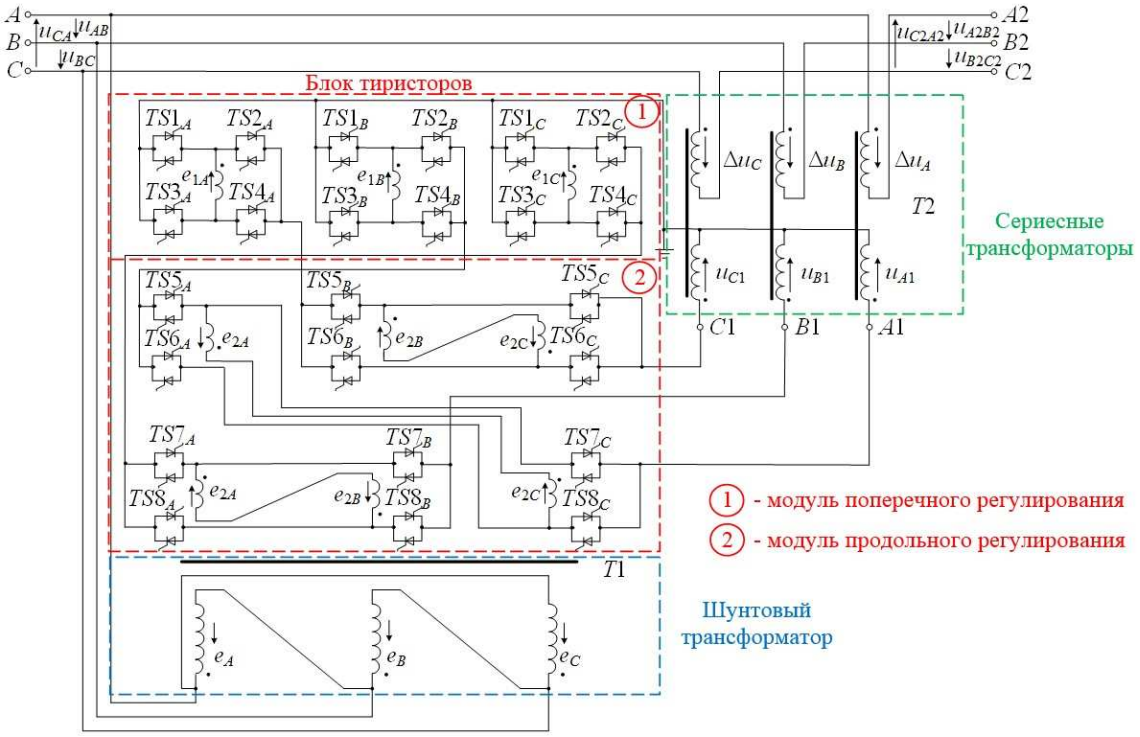


Рис. 4. Принципиальная схема силовой части ТРН

Силовая схема ТРН содержит тиристорные модули продольного и поперечного регулирования, шунтовой *T*1 и сериесные *T*2 трансформаторы.

Модуль поперечного регулирования (тиристорные коммутаторы *TS*1…*TS*4) вводит в линию изменяемую по величине ЭДС, сдвинутую на ±90° относительно фазного напряжения источника, и позволяет изменять величину потока активной мощности. Модуль продольного регулирования (тиристорные коммутаторы *TS*5…*TS*8) вводит в линию изменяемую по величине ЭДС, совпадающую или находящуюся в противофазе с фазным напряжением источника, что позволяет изменять величину потока реактивной мощности или стабилизировать напряжение сети. Продольно-поперечное регулирование выходного напряжения ТРН достигается за счет совместной работы модулей поперечного и продольного регулирования.

Первичные обмотки шунтового трансформатора *T*1 подключены к линейному напряжению сети 6(10) кВ. Его вторичные обмотки через тиристорные коммутаторы модулей поперечного и продольного регулирования подключены к первичным обмоткам сериесных трансформаторов *T*2. Вторичные обмотки сериесного трансформатора, включенные в рассечку линии 6(10) кВ, вносят в нее продольно-поперечную составляющую напряжения, регулируемую тиристорными коммутаторами по фазе и величине.

Управление тиристорами ТРН осуществляется импульсно-фазовым способом. Применение данного способа позволяет переводить ТРН в непроводящее состояние, тем самым меняя конфигурацию распределительной сети, а также оптимизировать напряжение в узлах нагрузки. При двухзонном поочередного управлении ТРН отсутствует необходимость применения датчика тока, поэтому регулировочные свойства ТРН сохраняются при глубоком изменении величины и фазы тока нагрузки.

На рис. 5 приведена векторная диаграмма входных и выходных линейных напряжений при совместной работе модулей продольного и поперечного регулирования.

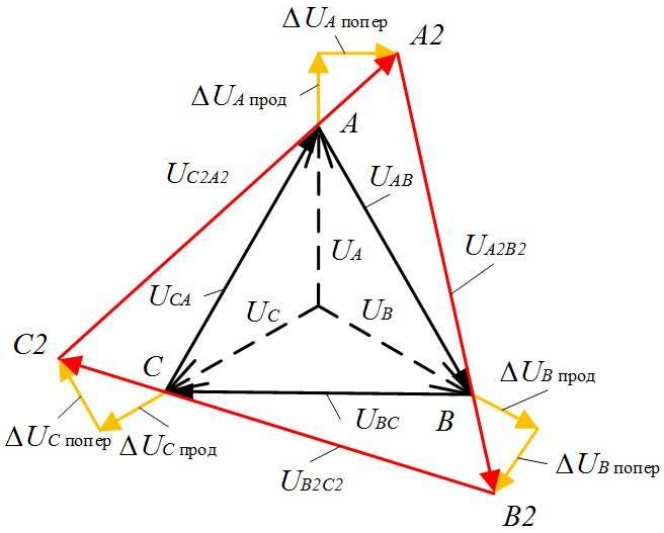


Рис. 5. Векторная диаграмма продольно-поперечного регулирования напряжения

Суммированием продольной и поперечной составляющих напряжения обеспечивается широкий диапазон регулирования ЭДС вольтодобавки. Это позволяет сдвигать выходной вектор напряжения относительно входного на ±5 электрических градусов и ±10% по амплитуде. Таким образом, при продольно-поперечном режиме ТРН происходит изменение величины и фазы напряжения, что позволяет влиять на потоки активной и реактивной мощности.

ТРН имеет двухуровневую систему управления. Технологическая система управления (ТСУ) является системой управления первого уровня. Задачей ТСУ является формирование команд управления тиристорами модулей продольного и поперечного регулирования. Активно-адаптивная система управления (ААСУ) – система управления второго уровня. ААСУ выполняет функции мониторинга и дистанционного управления ТРН.

Технические параметры ТРН приведены в таблице.

Технические параметры ТРН

Параметр	Значение
Номинальное напряжение	6(10) кВ ±10%
Диапазон изменения фазового угла напряжения α	± 5°
Дискретность изменения фазового сдвига напряжения α	1,5°
Диапазон регулирования величины напряжения	± 10%;
Дискретность регулирования величины напряжения	≤ 1,5%
Мощность нагрузки	≤ 1000 кВА
Мощность шунтового трансформатора	106 кВА
Мощность сериесного трансформатора	3×28 кВА

Подключение ТРН выполняется в рассечку линии 6(10) кВ. При выборе месторасположения ТРН учитываются уровни напряжения на шинах ТП. Предварительно проводится расчет падения напряжения в линии в режиме максимальных нагрузок с учетом роста нагрузок без и с учетом ТРН. По результатам расчетов строится эпюра распределения напряжения – график зависимости уровня напряжения от длины (рис. 6). После этого рассматривается место установки с точки зрения минимума потерь напряжения и удобства организации подъездных путей для монтажа и обслуживания ТРН. Оптимальным является подключение ТРН в линию перед ТП, напряжение питания потребителей которой близко к выходу за пределы допустимых значений. При этом с учетом диапазона регулирования ±10% от $U_{ном}$ напряжение до и после установки ТРН не должно выходить за допустимые пределы. Если установленный ТРН не обеспечивает допустимый уровень напряжения до конца линии, необходимо ставить еще один ТРН для регулирования напряжения в каскаде.

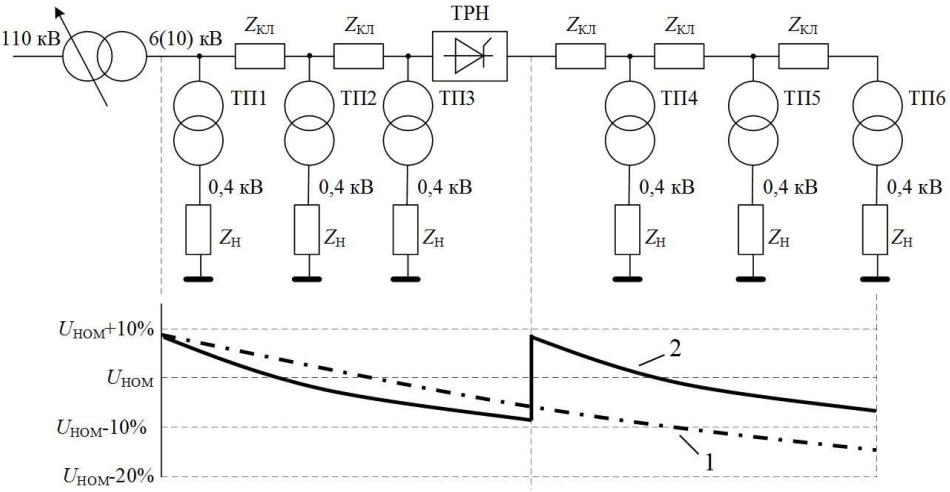


Рис. 6. Уровни напряжения на шинах 6(10) кВ ТП:
1 – участок РЭС без ТРН; 2 – участок РЭС с ТРН

Выводы. Проведен анализ качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий аграрного комплекса и сделан вывод, что КЭ превышает нормы, установленные в ГОСТ 32144. Выявлены причины низкого качества электроэнергии. Предложен ряд схемных решений по повышению КЭ. Даны рекомендации по применению средств повышения КЭ.

Список литературы

1. Вагин Г.Я., Куликов А.Л. Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния, методов нормирования и контроля // Электрические станции. 2019. № 6. С. 54 – 59.

2. Добрусин Л.А. Проблемы качества электроэнергии и электроснабжения в России // Энергоэксперт. 2008. № 4 (9). С. 30 – 35.

3. Suslov K., Solonina N., Gerasimov D. Assessment of an impact of power supply participants on power quality // 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Ljubljana, Slovenia. 2018. P. 1 – 5.

4. Жежеленко И.В., Шидловский А.К., Пивняк Г.Г., Саенко Ю.Л., Нойбергер Н.А. Электромагнитная совместимость потребителей: монография. М.: Машиностроение, 2012. 349 с.

5. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.

6. Вагин Г.Я., Куликов А.Л., Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н. Системы электроснабжения: учебник для вузов / Нижний Новгород: НГТУ, 2019. 462 с.

7. Куско А., Томпсон М. Сети электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества. М.: Додека-XXI, 2010. 336 с.

8. Материалы сайта Simross [Электронный ресурс] URL: https://simross.ru (дата обращения: 18.08.2020).

9. Положение ПАО Россети «О единой технической политике в электросетевом комплексе». [Электронный ресурс] URL: https://www.rosseti.ru/investment/science/tech/ (дата обращения: 10.08.2020).

10. Иванов В.Е. Разработка технических решений и рекомендаций по переводу действующих сетей 6-10 кВ на напряжение 20 кВ в сельской местности // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 4 (49). С. 36 – 41.

11. Чиндяскин В.И., Ионов В.В. Перевод сельских электрических сетей напряжением 6-10 кВ на 20 кВ // Совершенствование инженерно-технического обеспечения технологических процессов в АПК: Материалы Международ. науч.-практ. конф.: ОГАУ, Оренбург, 2017. С. 160 – 163.

12. Ефимов А.Ю., Молоков А.О., Артемов И.Н. Снижение потерь путем перехода в распределительных сетях 6/10 кВ на напряжение 20 кВ // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 4 (8). С. 17 – 26.

13. Князев В.В. Энергоэффективная технология передачи электрической энергии на напряжении 0,95 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2016. № 5 (38). С. 42 – 45.

14. IEEE C37.60-2003 - IEEE Standard Requirements for Overhead, Pad Mounted, Dry Vault, and Submersible Automatic Circuit Reclosers and Fault Interrupters for alternating current systems up to 38 kV. Standard by IEEE, 2003.

15. Методические указания по проектированию реклоузера РВА/TEL. – ГК «Таврида Электрик», 2014. 37 с.

16. Лоскутов А.Б., Чивенков А.И., Нажимов А.В., Асабин А.А., Солдатова М.С. Тиристорный регулятор напряжения трансформаторов 6-10 кВ // Промышленная энергетика. 2010. № 8. С. 30 – 33.

17. Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш. О трансформаторно-тиристорном регуляторе напряжения и мощности // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. № 4. С. 24 – 26.

18. Патент 2710660 РФ. Универсальный тиристорный регулятор величины вольтодобавочного напряжения / А.А. Асабин, Е.Н. Соснина, А.А. Кралин, Е.В. Крюков. Опубл. 30.12.2019. Бюл. № 1.

19. Кралин А.А., Крюков Е.В., Асабин А.А. Принципы работы тиристорного регулятора величины и фазы вольтодобавочного напряжения для распределительных сетей // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 2 (125). С. 112 – 118.

20. Kralin A.A., Bedretdinov R.Sh., Kryukov E.V., Pronina O.A. Research of thyristor voltage regulator effect on power flows control in distribution electric networks // International Conference of Energy System 2019 (ICES-2019), «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE)», Russia, Belgorod. Vol. 791. 2020. P. 1 – 9.

Вагин Геннадий Яковлевич, д-р. техн. наук, профессор, sevosaa@gmail.com, Россия, Нижний Новгород, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,

Куликов Александр Леонидович, д-р. техн. наук, профессор, inventor61@mail.ru, Россия, Нижний Новгород, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,

Севостьянов Александр Александрович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, sevosaa@gmail.com, Россия, Нижний Новгород, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,

Соснина Елена Николаевна, д-р техн. наук, профессор, sosnina@nntu.ru, Россия, Нижний Новгород, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,

Бедретдинов Рустам Шамилевич, канд. техн. наук, доцент, bedretdinov@nntu.ru, Россия, Нижний Новгород, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

METHODS AND MEANS OF POWER QUALITY IMPROVEMENT IN MEDIUM AND LOW VOLTAGE DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS

G.Ya. Vagin, A.L. Kulikov, A.A. Sevostyanov, E.N. Sosnina, R.Sh. Bedretdinov

A number of studies show that the power quality in low (0,4 kV) and medium (6…10 kV) voltage distribution electric networks exceed the acceptable standards. This leads to both technical and significant economic damage. The article is devoted to solving the problem of distribution electric networks power quality improving. We offer recommendations on methods and means to power quality improve in consumer power supply systems based on our own research and analysis of domestic and foreign works on the intellectualization of electric networks.

Key words: power quality, Smart Grid, power supply system, self-supporting insulated wire, recloser, automation, thyristor voltage regulators.

Vagin Gennady Yakovlevich, doctor of technical sciences, professor, sevosaa@gmail.com, Russia, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,

Kulikov Alexander Leonidovich, doctor of technical sciences, professor, inventor61@mail.ru, Russia, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,

Sevostyanov Aleksander Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, head of chair, sevosaa@gmail.com, Russia, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,

Sosnina Elena Nikolaevna, doctor of technical sciences, professor, sosnina@nntu.ru, Russia, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,

Bedretdinov Rustam Shamilevich, candidate of technical sciences, docent, bedretdinov@nntu.ru, Russia, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

УДК 621.311

МОСТОВОЙ ИНВЕРТОР КАК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ТРЁХФАЗНЫХ СЕТЕЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

С.Г. Воронин, О.О. Султонов

В статье рассматриваются особенности построения автономной системы электроснабжения малой мощности, в частности, на основе альтернативных источников электроэнергии для бытовых потребителей, не предъявляющих жёстких требований к содержанию высших гармоник в фазных напряжениях. Показано, что для этих целей может быть использован трёхфазный мостовой инвертор, преобразующий постоянное напряжение от первичного источника в ступенчатое трёхфазное напряжение промышленной частоты. Доказывается, что при использовании дискретного преобразователя удаётся относительно просто решить задачу симметрирования напряжения при несимметричной нагрузке. Вопросы симметрирования решаются не за счёт преобразования выходных напряжений в векторную форму с последующей реализацией процедуры симметрирования и обратного преобразования, а путём регулирования напряжения нулевого провода трёхфазной системы относительно одной из шин источника постоянного тока. Алгоритмически и технически процедура симметрирования при этом оказывается существенно проще. Ступенчатый характер выходного напряжения при правильном выборе способа коммутации ключей не приводит к появлению содержания высших гармоник в составе фазных напряжений, превышающих допустимые нормативными документами значения.

Ключевые слова: мини ГЭС, возобновляемые источники энергии, полупроводниковый преобразователь, высшие гармоники напряжения, качество электроэнергии, несимметричная нагрузка, симметрирование напряжения, дискретная коммутация, трехфазный автономный инвертор, пропорционально- интегральный регулятор.

Одной из наиболее актуальных проблем современного электроснабжения является проблема обеспечения качества электроэнергии [1] Основная причина ухудшения качества электроэнергии широкое распространение нелинейных и несимметричных нагрузок в трёхфазной сети, создающих при своей работе токи несинусоидальной формы. Кроме того, высшие гармоники, которые можно представить в виде бесконечной суммы гармоник, частоты которых кратны основной частоте питающей сети, могут возникать и в результате несовершенства генерирующих установок. Высшие гармоники оказывают неблагоприятное влияние на работу силового электрооборудования, устройств релейной защиты и автоматики, вызывают ускоренное старение изоляции. Потери мощности в распределительной сети низкого напряжения из-за нелинейных и несимметричных нагрузок составляют до 10 процентов от средней передаваемой мощности [2].

Таким образом, важно ограничить эти факторы ухудшения качества электроэнергии. Ряд законов и стандартов, касающихся качества электроэнергии [3-9], устанавливаются путем введения ограничений на гармоники тока и несимметрию напряжения. Когда речь идет о нелинейных и несимметричных нагрузках, они создают серьезные проблемы в изолированных системах, таких как мини ГЭС, работающих в автономном режиме [10-11]. Многочисленные технические решения для понижения гармоник тока (активные фильтры) и повышения коэффициента мощности (батареи конденсаторов) уже успешно применяются на практике. [12]. В то же время значительно возросло использование возобновляемых источников энергии в качестве удаленных энергоблоков. В связи с этим, проблема несимметрии с гармоническим загрязнением стала особенно ощутимой, поскольку мини- ГЭС обеспечивают питание в равной степени как трёхфазных, так и однофазных нагрузок. Для высокой эффективности преобразования постоянного тока

в переменный и отслеживания пиковой мощности инвертор должен иметь низкое гармоническое искажение наряду с низкими электромагнитными помехами и высоким коэффициентом мощности. Существует несколько методов переключения для управления инвертором источника напряжения для подавления гармоник и для управления несбалансированными нагрузками [13-16]. Метод дискретной управления силовых ключей является одним них [17]. Работоспособность схемы с дискретной коммутацией может быть оценена на основе анализа уровня искажения на выходе инвертора, спектра гармоник, содержащихся в этом напряжении и сложности реализации. В этой статье основное внимание будет уделено моделированию преобразователей напряжения с дискретной коммутацией на основе трехфазного инвертора, питающего несбалансированную нагрузку. Обсуждаются различные типы топологий трехфазного инвертора и методы модуляции напряжения.

Методы дискретной модуляции трёхфазного напряжения. Принципиальная схема базового трехфазного инвертора как источника напряжения показана на рис. 1. Входное постоянное напряжение может быть от источника постоянного тока или выпрямленного переменного напряжения. Трехфазный инвертор может быть построен путем объединения трех однофазных полумостовых инверторов [17-18]. Он состоит из шести полупроводниковых ключей с обратными диодами. Полупроводниковые ключи периодически открываются и замыкаются в нужной последовательности для получения желаемой формы выходного сигнала. Принципиально возможны три схемы стробирования устройств:

1. Каждый ключ инвертора открыт на интервале 120^0;
2. Каждый ключ инвертора открыт на интервале 180^0;
3. Каждый ключ инвертора открыт на интервале 150^0.

В этом режиме в любой момент времени открыты только два ключа, один из верхней группы, другой- из нижней. Импульсы, поступающие на затвор ключа, указывает период его проводимости и требуется шесть коммутаций за цикл. В этом случае один период напряжения на выходе инвертора разделен на шесть интервалов. Последовательность срабатывания шести ключей показана в табл. 1.

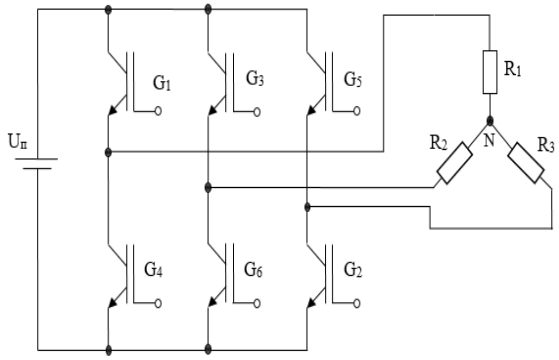


Рис. 1. Принципиальная схема инвертора источника трехфазного напряжения

Таблица 1

Параметры мощности проводимости 180 градусов

№ п/п	Интервал	180 степень коммутации			
		ключ	полярность		
	(степень)	“on”	A	B	C
1.	0-60	G1, G5, G6	+	-	+
2.	60-120	G2, G6, G1	+	-	-
3.	120-180	G3, G1, G2	+	+	-
4.	180,240	G4,G2, G3,	-	+	-
5.	240-300	G3, G4, G5	-	+	+
6.	300-360	G4, G5 G6,	-	-	+

В режиме проводимости 180^0 каждый ключ работает в течение периода 180^0 в течение полупериода. Полупроводниковые ключи срабатывают по порядку их номеров с интервалом 60^0 по три ключа на интервале [17]. Работу схемы можно понять из табл. 2.

Таблица 2

Работа в режиме проводимости 120 градусов

№	Интервал	120 степень коммутации			
		ключ	полярность		
	(степень)	“on”	A	B	C
1.	0-60	G1, G6	+	0	-
2.	60-120	G3, G6	0	+	-
3.	120-180	G3, G2	-	+	0
4.	180,240	G5, G2	-	0	+
5.	240-300	G5, G4	0	-	+
6.	300-360	G1, G4	+	-	0

В 150-градусном режиме проводимости инвертора каждый ключ проводит на интервале 150 градусов [15]. Он имеет двенадцать шагов, каждый из которых имеет продолжительность 30 градусов для завершения одного цикла выходного переменного напряжения. Это устраняет гармоники более низкого порядка в большей степени. Проводимость различных ключей приведена в табл. 3.

Таблица 3

Работа в режиме проводимости 150 градусов

№	интервал	150 степень коммутации			
		ключ	полярность		
	(степень)	“on”	A	B	C
1.	0-60	G1, G2, G6	+	-	-
2.	60-120	G1,G2	+	0	-
3.	120-180	G1, G2, G3	+	+	-
4.	180,240	G2, G3	0	+	-
5.	240-300	G2, G3, G4	-	+	-
6.	300-360	G3, G4	-	+	0
7.	360-420	G3,G4, G5	-	+	+
8.	420-480	G4, G5	-	0	+
9.	480-540	G4, G5, G6	-	-	+
10.	540-600	G5, G6	0	-	+
11.	600-660	G1, G5, G6	+	-	+
12.	660-720	G1,G6	+	-	0

Моделирование инвертора как источника напряжения с использованием техники дискретной коммутации. В данном случае 120^0 и 180^0 дискретной коммутация сравнивается с 150^0 дискретной коммутаций. Форма сигнала фазного напряжения инвертора показана на рис. 3, 4 и 5.

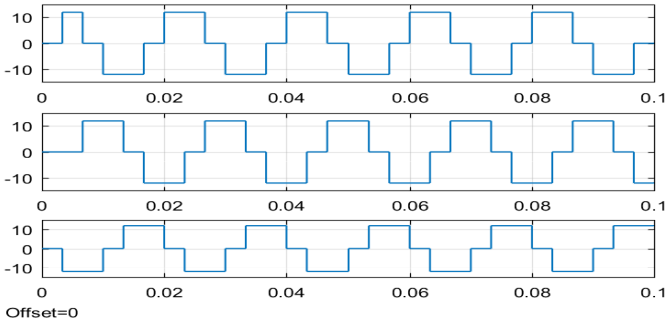


Рис. 3. Форма сигнала фазного напряжения при 120^0

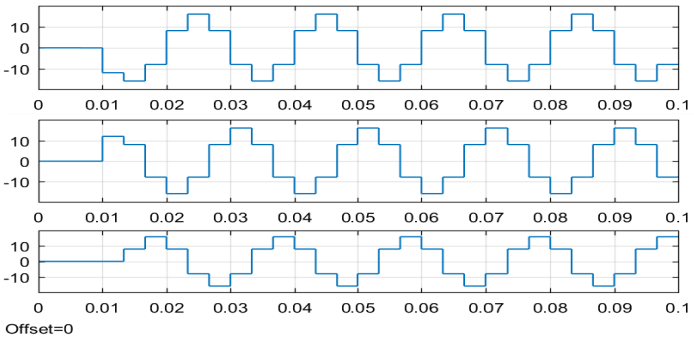


Рис. 4. Форма сигнала фазного напряжения при 180^0

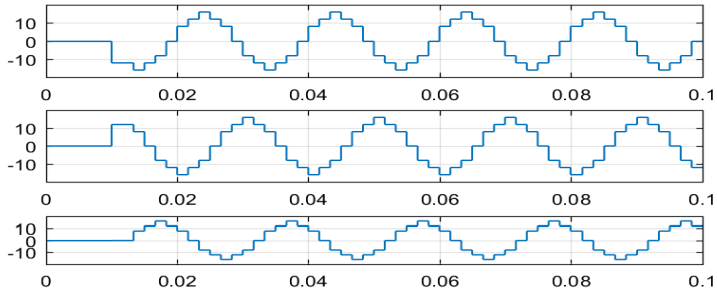


Рис. 5. Форма сигнала фазного напряжения при 150^0

Результаты моделирования MATLAB. Моделирование инвертора трехфазного источника напряжения с использованием метода селективного подавления гармоник осуществляется с помощью MATLAB/Simulink. Описан макет схем инвертора трехфазного источника напряжения. Питание постоянного тока для инвертора трехфазного источника напряжения осуществляется от регулируемого источника питания. Аппаратные компоненты инвертора с трехфазным источником напряжения состоят из силовой цепи, схемы драйвера, схемы защиты и схемы управления. В трехфазном инверторе источника напряжения в качестве переключателя используется полупроводниковый полевой транзистор (IGBT). Схема управления состоит из блока микроконтроллера и схемы драйвера. Блок микроконтроллера используется для генерации импульсов затвора для ключа инвертора через схему драйвера. Проект прошел экспериментальную проверку и получены результаты по коммутации импульсных, фазных и линейных напряжений. На рис. 6 показана общая блок-схема оборудования. Блок-схема состоит из регулируемого источника питания, инвертора трехфазного источника напряжения, контроллер и схемы драйвера. Входное питание инвертора - 24В постоянного тока от источника питания с двойной регулировкой. В инверторе используются переключатели IGBT. Схема драйвера используется для управления IGBT.

Силовое напряжение постоянного тока подаётся на вход трехфазного инвертора, а на выход подключается трехфазная нагрузка. Управляющие сигналы, которые генерируются контроллером, подаются в качестве входных сигналов для стробирующих сигналов ключей через схему драйвера. Драйвер используется для управления ключами инвертора. Выходное напряжение переменного тока генерируется на выходной стороне инвертора трехфазного источника напряжения через трехфазную нагрузку, соединенную звездой, с методом подавления гармоник. Форма выходного сигнала и общее гармоническое искажение (ОГИ) измеряются с помощью цифрового запоминающего осциллографа и гармонического анализатора. Последний анализирует содержание высших гармоник с помощью быстрое преобразование Фурье (БПФ). Содержание высших гармоник для каждого метода управления ключами показан на рис. 7, 8 и 9. На рис. 7 показаны результаты анализа для метода 120^0- дискретной коммутации.

На рис. 8 показан анализ БПФ для инвертора с трехфазным источником напряжения со 180^0- дискретной коммутацией.

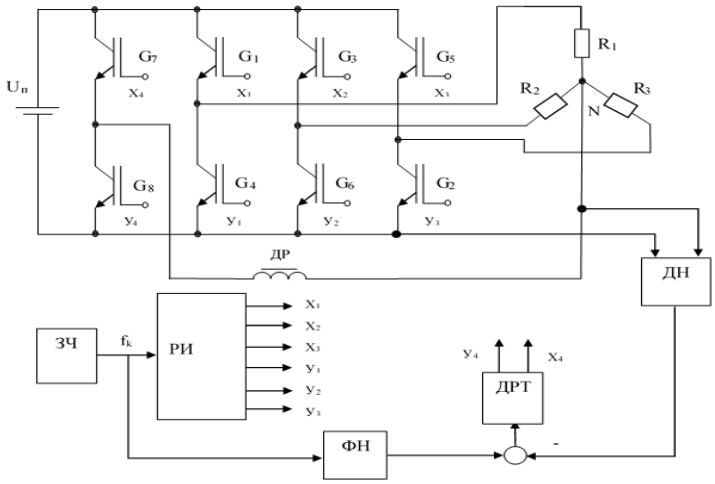


Рис. 6. Общая структурная схема оборудования:
ДН- датчик напряжения нулевой точки относительно шины «минус» источника питания; ЗЧ- задатчик частоты коммутации ключей; РИ- распределитель импульсов управления ключами; ФН- формирователь заданного значения напряжения общей точки; ДРТ- дискретный регулятор тока

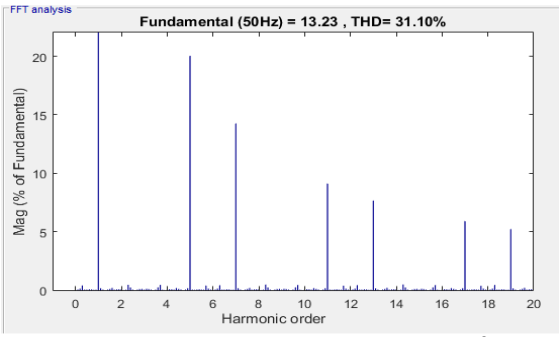


Рис. 7. Анализ БПФ для трехфазного напряжения 120^0 дискретной коммутация

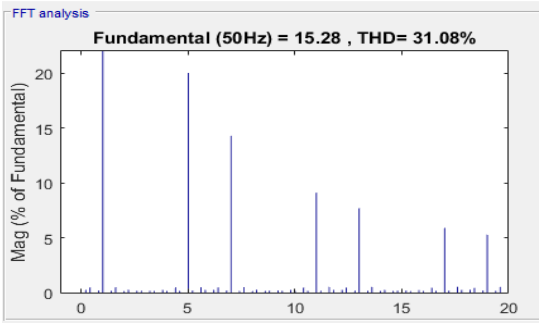


Рис. 8. Анализ БПФ для трехфазного напряжения 180^0 дискретной коммутация

На рис. 9 представлен анализ БПФ для трехфазного напряжения со 150^0 дискретной коммутация.

В табл. 4 показаны результаты сравнения между методом дискретной коммутации для инвертора с трехфазным источником напряжения и избирательным подавлением гармоник для инвертора с трехфазным источником напряжения для различных способов коммутации. Из сравнения видно, что метод 150^0 дискретной коммутация с точки зрения отношения величины действующего значения первой гармоники к действующему значению полного выходного напряжения ($k_в$) лучше, чем 120^0 и 180^0 дискретной коммутация.

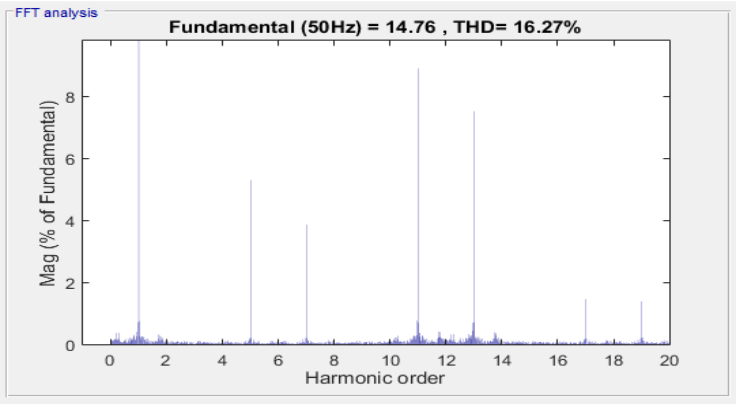


Рис. 9. Анализ БПФ для трехфазного напряжения 150^0 дискретной коммутация

Таблица 4

Сравнение результатов

№	Параметр	Способ коммутации		
		120^0	150^0	180^0
1	Hz	50	50	50
2	$k_в$	0,954	0,979	0,955

Симметрирование напряжения на выходе полупроводникового преобразователя при несимметричных нагрузках в последние несколько лет вызывает повышенный интерес учёных в связи с её актуальностью и решается, как правило, с использованием преобразований сигналов из трехмерной системы координат в двухмерную [19-25]. При этом требуется использование системы датчиков токов и напряжений (по крайней мере по два на каждый параметр) и отказ любого из них может привести к нарушению алгоритма симметрирования. В электрических сетях бытовых сельских потребителей весьма вероятны перегрузки по фазным токам и короткие замыкания, что может привести к повреждениям датчиков тока. В [23] приведены некоторые недостатки традиционные методы управления с точки зрения завышенного объёма используемых вычислительных операций. Что также приводит к снижению надёжности таких систем.

Можно решать вопросы симметрирования напряжений без преобразований координат с использованием только одного датчика напряжения нулевого провода относительно одной из шин инвертора [17]. Структурная схема такого метода показана на рис. 6. Здесь система управление ключами инвертора разделена на две группы. Первый G1-G6, предназначенная для управления силовыми ключами трёхфазного инвертора, поступает на эти ключи, а вторая (G7, G8) поступает на ключи дополнительной четвёртой стойки для регулирования напряжения нулевого провода относительно шины на уровне либо $0{,}33U_п$, либо $0.66U_п$ [17].

Заключение. В результате проведённых исследований в среде «MatLab» можно сделать следующее выводы:

1. Использование дискретной коммутации ключей трёхфазного инвертора может обеспечить выходное напряжение с содержанием высших гармоник, хотя и большим, чем при синусоидальной широтно- импульсной модуляции, однако удовлетворяющим требованиям к качеству электроэнергии для бытовых потребителей.

2. Особенно хороший результат в этом плане получим при 180 и 150 градусной коммутации, обеспечивающих отношение действующего значения первой гармоники к действующему значению полного фазного напряжения 0,955 и 0,979 соответственно.

3. В случае дискретной коммутации вопросы симметрирования фазных напряжений при несимметричной нагрузке решаются значительно проще, чем при синусоидальной широтно- импульсной модуляции. Для этого достаточно с помощью замкнутой системы регулировать напряжение нулевого провода относительно шины источника постоянного тока га каждом такте коммутации.

Список литературы

1. Жежеленко И.В. «Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий 2-е изд.». М.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.

2. IEC 61000-2-8:2002 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 2—8: Environment — Voltage dips, short interruptions on public electric power supply system with statistical measurement results. 2002.

3. Yunwei L., Vilathgamuwa D.M., Chiang, L.P. Microgrid power quality enhancement using a three-phase four-wire grid-interfacing compensator // IEEE Trans. Power Electron. 2005. Vol. 19. No. 1. P. 1707-1719.

4. Thomas S.Key, Senior Member, IEEE, and Jih-Sheng Lai, Senior Member. IEEE-Comparison of Standards and Power Supply Design Options for Limiting Harmonic Distortion in Power Systems // IEEE tkansactions on industry applications. 1993. Vol. 29. Ko. 1. 1993.

5. Thomas S. Key Jih-Sheng Lai IEEE and International Harmonic Standards Impact on Power Electronic Equipment Design // Power Electronics Applications Center 1052 1 Research Drive, Suite 400 Knoxville, Tennessee 37932 Virginia Power Electronics Center 661 Whittemore Hall Blacksburg, Virginia 24061-01 11.

6. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1-7: General – Power factor in single-phase systems under non-sinusoidal conditions. IEC TR 61000-1-7:2016 © IEC 2016.

7. Electromagnetic compatibility – Part 1-8: General – Phase angles of harmonic current emissions and voltages in the public supply networks – Future expectations IEC TR 61000-1-8:2019 © IEC 2019.

8. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-2: Environment – Compatibility levels for lowfrequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems IEC 61000-2-2:2002+AMD1:2017 +AMD2:2018 CSV © IEC 2018.

9. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤16 A per phase) IEC 61000-3-2:2018+AMD1:2020 CSV © IEC 2020.

10. Аминов Д., Косимов Б., Султонов О. Разработка погружного гидрогенератора как возобновляемого источника электроэнергии для малых рек // Международная российская конференция по автоматизации 2020 (РусАвтоКон). Сочи, 2020. С. 1079-1084. DOI: 10.1109 / РусАвтоКон49822.2020.9208214.

11. Воронин С.Г., Давлатов А.М., Султонов О.О., Косимов Б.И., Гулов Д.Ю. Автоматизированные малые ГЭС как основа электрических сетей горных регионов Таджикистана // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2019. 19. С. 100–107. DOI: 10.14529 / power190311.

12. Kavita Dewangan1, Prof. Pawan C. Tapre2 «Harmonic Reduction by Using Shunt Hybrid Power Filter». 1SSTC (SSGI), Junwani, Bhilai and 490001, India 2Prof. of SSTC (SSGI), Junwani, Bhilai and 490001, India ISSN (e). 2014. 2250 – 3005. Vol, 04 Issue.

13. Ali Mehri, Daryoosh Nazarpour. Harmonic Compensation and Load Balancing Using Cascaded H-bridge Multilevel Inverter in High Voltage Systems // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). 2013. Vol. 3. Issue 2. P. 637-643.

14. Sasaki H., Machida T. A new method to eliminate ac harmonic currents by magnetic compensation—Consideration on basic design // IEEE Trans. Power App. Syst., 1971. Vol. 90. No. 5. P. 2009–2019.

15. Abhishek M. Patel THD Comparison for 180, 120 & 150 Degree Conduction Mode of Three Phase Inverter // International Journal for Scientific Research & Development, 2018. Vol. 6. Issue 03. 2321-0613.

16. Rioual P., Pouliquen H., Louis H.P. Control of a PWM rectifier in the unbalanced state by robust voltage regulation // in Proc. 5th Eur. Conf. Power Electron. Appl., 1993. Sep. 13–16. Vol. 4. P. 8–14.

17. Воронин С., Султонов О., Гулов Д. Балансировка напряжения на выходе трехфазного полупроводникового преобразователя // Российский семинар IEEE по энергетике и автоматизации металлургической промышленности: исследования и практика, 2019. С. 94–98. DOI: 10.1109 / PEAMI.2019.8915374.

18. Воронин С.Г., Коробатов Д.В., Кузнецов В.В. Запунный, П. Шабуров. Векторное управление приводом клапана» // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергия». 2004. Вып. 5 - №4 (33). С. 11-15.

19. Song H.S., Nam K. Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions // IEEE Trans. Ind. Electron., 1999. Vol. 46. No. 5. P. 953–959.

20. Reef Aboelsaud, Ibrahim A., Garganeev A.G. Voltage Control of Autonomous Power Supply Systems Based on PID Controller Under Unbalanced and Nonlinear Load Conditions, 2019.

21. Hsu P., Behnke M. A three-phase synchronous frame controller for unbalanced load // Power Electronics Specialists Conference, 1998. PESC 98 Record. 29th Annual IEEE, Vol. 2. 1998. P. 1369–1374.

22. Mohair M., Golshannavaz S., Nazarpour D., Aminifar F. Design of an Asymmetrical Three-phase Inverter for Load Balancing and Power Factor Correction Based on Power Analysis // Journal of Electrical Engineering & Technology. 2011. Vol. 6, No. 3. P. 293–301.

23. Xuan HoaThi Pham, ToiThanh Le, Hieu Tran Trong. Control Power Sharing of Parallel Inverters in Microgrid with Consideration of Line Impedance Effect // American Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2019. Vol. 8. No. 5. P. 127-144. DOI: 10.11648/ j.epes.20190805.15.

24. Dementyev Yu.N., Bragin A.D., Kojain N.V., Udut L.S. Control System with Sinusoidal PWM Three-Phase Inverter with a Frequency Scalar Control of Induction Motor // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications.

25. Харитонов С.А., Берестов В.М. Анализ синусоидальной ШИМ на натуральном образце (методический аспект) // Техническая электродинамика. Спецвыпуск: Силовая электроника и энергоэффективность. Часть 2. Киев, 2002. С. 31-37.

Воронин Сергей Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, sosnovka.voronin@yandex.ru, Россия, Челябинск, Южно-Уральского государственного университет,

Султонов Оламафруз Олимович, аспирант, olam.c89@mail.ru, Россия, Челябинск, Южно-Уральского государственного университет

BRIDGE INVERTER AS A VOLTAGE CONVERTER FOR AUTONOMOUS THREE-PHASE LOW POWER NETWORKS

S.G. Voronin, O.S. Olamafruz

The article discusses the features of building an autonomous low-power power supply system, in particular, based on alternative sources of electricity for household consumers that do not impose strict requirements on the content of higher harmonics in phase voltages. It is shown that for these purposes a three-phase bridge inverter can be used, which converts a constant voltage from a primary source into a three-phase step voltage of an industrial frequency. It is proved that when using a discrete converter, it is relatively easy to solve the problem of the voltage balancing with an unbalanced load. Balancing issues are solved not by converting the output voltages into a vector form with the subsequent implementation of the balancing and reverse conversion procedure, but by regulating the neutral wire three-phase voltage system relative to one of the DC buses. Algorithmically and technically, the balancing procedure turns out to be much simpler. The stepped nature of the output voltage, with the correct choice of the switching method of the keys, does not lead to the appearance of the content of higher harmonics in the composition of phase voltages that exceed the values allowed by the regulatory documents.

Key words: mini HPP, higher voltage harmonics, power quality, unbalanced load, voltage balancing, renewable energy sources, discrete commutation, three-phase autonomous inverter, semiconductor converter, proportional-integral controller.

Voronin Sergey Grigorievich, doctor of technical sciences, professor, sosnovka.voronin@yandex.ru, Russia, Chelyabinsk, South Ural State University,

Olamafruz Olimovich Sultonov, postgraduate, olam.c89@mail.ru, Russia, Chelyabinsk, South Ural State University

УДК 681.515

ПОВЫШЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С МОДАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ И УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Н.С. Сластихин

В статье обсуждаются синтез и исследование электромеханической системы с модальным регулятором, удовлетворяющей заданным динамическим показателям при условии увеличения жесткости механической характеристики. Описан двухмассовый электромеханический объект управления. Приведен способ расчета параметров модального регулятора по условию достижения динамических показателей системы. Выполнено исследование математической модели синтезированной системы с модальным регулятором при воздействии момента сопротивления на механическую часть объекта управления.

Ключевые слова: модальный регулятор, жесткость характеристики, обратная связь, электромеханическая система.

Современные регулируемые электроприводы даже в линейном приближении представляют собой сложные объекты управления, которым трудно придать желаемые динамические и статические показатели движения рабочего органа. К таким электроприводам можно отнести приводы с большим количеством взаимосвязанных координат, с многомассовой подвижной частью, со многими входами и выходами [1].

При повышении требований к электроприводу, что почти всегда связано с необходимостью увеличения его быстродействия, упругость начинает влиять на работу установки. В системе возникают колебания, что приводит к повышенному износу, а иногда и поломке деталей, влияет на качество продукции и производительность механизма [2].

Одним из наиболее перспективных методов синтеза регуляторов, используемых в системах автоматизации, является модальное управление, позволяющее повысить быстродействия и устранить колебания при наличии упругости в кинематических связях [3].

В работе [4] рассмотрена возможность реализации системы модального управления двухмассовым электромеханическим объектом с упругой связью, определены коэффициенты обратных связей по переменным состояния объекта с учетом достижения заданной жесткости механической характеристики. Исследование графиков переходных процессов по скорости второй массы показало достижение желаемого значения жесткости.

Однако в этом случае быстродействие системы значительно увеличилось и оказалось подчинено выбранной жесткости, что может не удовлетворять техническим требованиям. С другой стороны, увеличение быстродействия приводит к формированию форсировки в законе управления, что не всегда достижимо по условиям ограничения максимального тока двигателя.

В рамках развития исследовательской работы [4] предлагается выполнить синтез системы с модальным регулятором по условию увеличения жесткости механической характеристики и заданному быстродействию.

В качестве объекта управления рассматривается линейная стационарная двухмассовая электромеханическая система с упругостью. В состав системы входят: двигатель постоянного тока независимого возбуждения, преобразователь, упругий элемент с коэффициентом жесткости C и вторая масса с моментом инерции J_2 равным моменту инерции якоря двигателя J_1. При таком соотношении моментов инерции в системе без коррекции возникают значительные колебания второй массы.

В математическом описания объекта управления приняты следующие допущения: магнитный поток возбуждения электродвигателя постоянный, сопротивление якоря не зависит от температуры проводника, преобразователь представляет собой безинерционное звено, отсутствие вязкого трения в механической системе, масса упругого элемента принята равной нулю [2].

С учетом принятых допущений, в качестве системы уравнений состояния возьмем уравнение равновесия напряжений, составленное для якорной цепи, а также уравнение равновесия моментов для вращательного движения двухмассовой системы. Система уравнений состояния объекта управления примет следующий вид:

$$\begin{cases} u_{\text{у}} \cdot K_{\text{П}} = R_{я} \cdot i_{я} + L_{я} \cdot \dfrac{di_{я}}{dt} + k\Phi \cdot \omega_1, \\ J_1 \cdot \dfrac{d\omega_1}{dt} = k\Phi \cdot i_{я} - M_{\text{у}}, \\ J_2 \cdot \dfrac{d\omega_2}{dt} = M_{\text{у}} - M_{\text{С}}, \\ M_{\text{у}} = c \cdot (\varphi_1 - \varphi_2), \end{cases}$$

где $u_{\text{у}}$ – напряжение управления, В; $K_{\text{П}}$ — коэффициент, учитывающий преобразователь напряжения; $R_{я}$ — активное сопротивление якоря, Ом; $i_{я}$ – ток якорной цепи, А; $L_{я}$ — индуктивность якоря, Гн; $к$ — коэффициент, зависящий от конструктивных данных двигателя; Ф — магнитный поток, Вб; ω_1 — угловая скорость двигателя, 1/с; M — электромагнитный момент двигателя, Н·м; $M_{\text{у}}$ — момент упругости, Н·м; J_1 — момент инерции якоря двигателя, кг·м^2; ω_2 — угловая скорость механизма, 1/с; J_2 — момент инерции механизма, кг·м^2; φ_1 — угол поворота первой массы, рад.; φ_1 — угол поворота второй массы, рад.; $M_{\text{с}}$ — момент сопротивления, Н·м.

Закон модального управления в системе, с учётом измерения всех переменных состояния объекта имеет следующий вид [4]:

$$u_{\text{у}} = k_{\text{у}} \cdot \left(v - k_1 \cdot i_{\text{я}} - k_2 \cdot \omega_1 - k_3 \cdot \omega_2 - k_4 \cdot M_{\text{у}}\right),$$

где $k_{\text{у}}$ – коэффициент усиления в прямом канале управления, v – задающее напряжение, k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты обратных связей по переменным состояния ω_1, $i_{я}$, ω_2, $M_{\text{у}}$ соответственно. В этом случае уравнение жесткости в замкнутой системе $\beta_{\text{з}}$ примет вид:

$$\beta_{\text{з}} = \frac{1 + k_0 \cdot k_{\text{у}} \cdot k_2 + k_0 \cdot k_{\text{у}} \cdot k_3}{1 + k_0 \cdot k_{\text{у}} \cdot k_1 \cdot \beta + k_0 \cdot k_{\text{у}} \cdot k_4 \cdot \beta} \cdot \beta,$$

где k_0 – коэффициент усиления разомкнутой системы, β – жесткость в разомкнутой системе.

Для увеличения жесткости при любых значениях коэффициентов модального регулятора возьмем другой набор обратных связей по переменным состояния $di_я/dt$, ω_1, ω_2, $d\omega_2/dt$. Закон модального управления с выбранными обратными связями примет следующее выражение:

$$u_у = k_у \cdot \left(v - k_1 \cdot \frac{d}{dt} i_я - k_2 \cdot \omega_1 - k_3 \cdot \omega_2 - k_4 \cdot \frac{d}{dt} \omega_2 \right).$$

Тогда жесткость в замкнутой системе

$$\beta_з = \left(1 + k_0 \cdot k_у \cdot k_2 + k_0 \cdot k_у \cdot k_3\right) \cdot \beta,$$

как видно из выражения цель – увеличение жесткости достигается.

Для расчета коэффициентов модального регулятора задаются следующие параметры электромеханического объекта: номинальное напряжение якорной цепи $U_н$=220 В, номинальная мощность электродвигателя $P_н$=11 кВт, номинальный ток якорной цепи $I_н$=63 А, номинальная угловая скорость электродвигателя $\omega_н$=78,54 1/с, индуктивность якорной цепи $L_я$=13,9 мГн, сопротивление якорной цепи $R_я$=0,39 Ом, момент инерции первой массы J_1=0,3 кг·м^2, момент инерции второй массы J_2=0,3 кг·м^2, жесткость пружины c=15 Н/м. Время переходного процесса $t_{пп}$=0,2 с. Динамические свойства должны соответствовать уравнению

$$F_{жел}(p) = (p + \omega_0)^4,$$

где $F_{жел}(p)$ – желаемый характеристический полином; ω_0 – базовая частота.

Коэффициент k_2 рассчитывается по условию:

$$k_2 = \frac{v}{\omega_н} = 0{,}127 .$$

Соотношения для вычисления коэффициентов модального регулятора примут следующий вид:

$$\frac{52{,}5}{1 + 1582{,}7 \cdot k_у \cdot k_1} = 4 \cdot \omega_0; \quad \frac{\left(1277{,}1 + 158270 \cdot k_у \cdot k_1 + 11689 \cdot k_у \cdot k_2\right)}{1 + 1582{,}7 \cdot k_у \cdot k_1} = 6 \cdot {\omega_0}^2;$$

$$\frac{\left(5251{,}8 + 584440 \cdot k_у \cdot k_4\right)}{1 + 1582{,}7 \cdot k_у \cdot k_1} = 4 \cdot {\omega_0}^3; \quad \frac{\left(58857 + 584440 \cdot k_у \cdot k_2 + 584440 \cdot k_у \cdot k_3\right)}{1 + 1582{,}7 \cdot k_у \cdot k_1} = {\omega_0}^4.$$

Коэффициент k_2 рассчитывается по условию:

$$k_2 = \frac{v}{\omega_н}.$$

Используя заданное время переходного процесса, вычислим базовую частоту ω_0=37,5. Коэффициенты модального регулятора примут следующие значения: k_1=-3,5*10^{-4}, k_2=0,127, k_3=0,8, k_4=0,1, $k_у$=1,17.

Исследование синтезированной системы управления проведем с использованием прикладного приложения MatLab Simulink. Структурная схема изображена на рис. 1.

График переходного процесса скорости вращения второй массы, при воздействии момента сопротивления равного номинальному моменту электродвигателя приведен на рис. 2.

Дополнительно на рис. 2 представлены графики переходных процессов систем модального управления, синтезированных по условиям достижения заданной жесткости механической характеристики [4] (значение жесткости равно 7) и достижения заданных динамических показателей без учета жесткости (значение жесткости равно 2,2).

Анализ графиков переходных процессов показывает, что с помощью выбора соответствующих обратных связей имеется возможность увеличения жесткости механической характеристики (значение жесткости равно 77) при учете желаемых динамических показателей. Также следует отметить отказ от обратной связи по упругому моменту, что в свою очередь позволяет не использовать датчик момента.

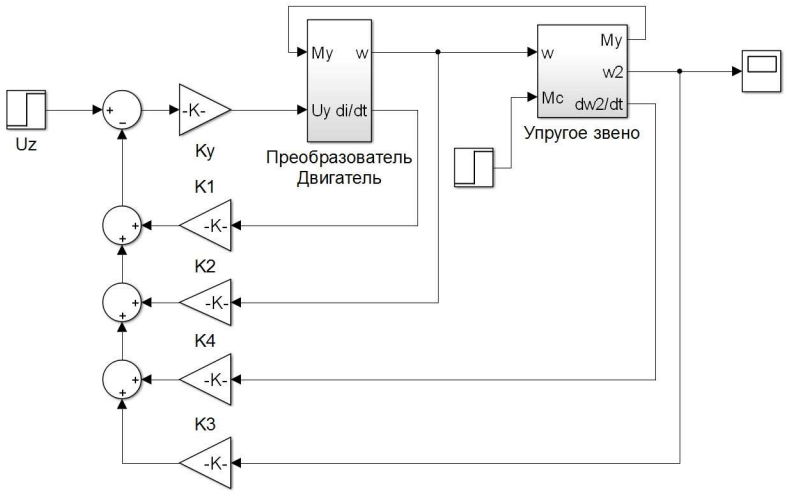


Рис. 1. Структурная схема электромеханической системы с модальным регулятором

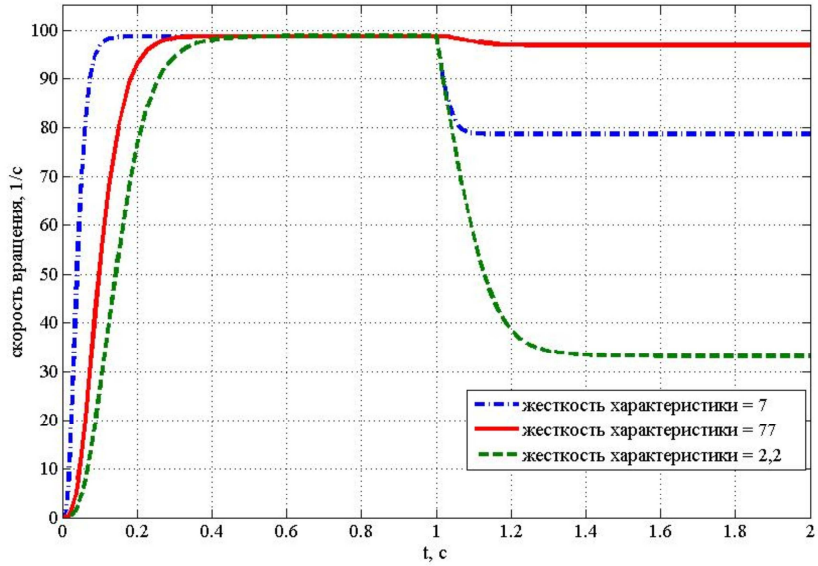


Рис. 2. График переходного процесса скорости вращения второй массы

Следовательно, при проектировании систем управления с модальным регулятором необходимо рассматривать возможность выбора различных наборов обратных связей, для достижения желаемых статических и динамических показателей электромеханической системы.

Список литературы

1. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. М.: Академия, 2005. 300 с.

2. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями // СПб.: Энергоатомиздат. 1992. 288 с.

3. Григорьев В.В., Журавлёва Н.В., Лукьянова Г.В., Сергеев К.А. Синтез систем автоматического управления методом модального управления. С-Пб: СПбГУ ИТМО, 2007. 108 с.

4. Сластихин Н.С. Ишутинов Д.В. Улучшение статических свойств электромеханической системы с модальным управлением // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 9. С. 597-601.

Сластихин Николай Сергеевич, старший преподаватель, favt_slastihin@vyatsu.ru, Россия, Киров, Вятский государственный университет

INCREASING THE MECHANICAL RIGIDITY CHARACTERISTICS IN THE ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH A MODAL REGULATOR AND TAKING INTO ACCOUNT DYNAMIC INDICATORS

N.S. Slastikhin

The article discusses the synthesis and study of an electromechanical system with a modal controller that meets the specified dynamic parameters under the condition of increasing the rigidity of the mechanical characteristic. A two-mass electromechanical control object is described. A method for calculating the parameters of a modal controller based on the condition of achieving dynamic indicators of the system is given. A mathematical model of a synthesized system with a modal controller under the influence of the moment of resistance on the mechanical part of the control object is studied.

Key words: modal controller, stiffness characteristics, feedback, electromechanical system.

Slastikhin Nikolay Sergeevich, senior lecturer, favt_slastihin@vyatsu.ru, Russia, Kirov, Vyatka state University

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 539.374

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ОТКЛИКА МИКРОГЕОМЕТРИИ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ИМПУЛЬСНОЕ НАГРУЖЕНИЕ

В.Л. Баранов, Р.А. Тер-Данилов

В статье решается задача ударного нагружения единичной микронеровности моделируемой сферическим элементом, ставится задача распространения упруго-вязко-пластических волн напряжений в микронеровности.

Ключевые слова: микрогеометрия, микронеровность, приработка.

На этапе проектирования узлов автоматики стрелково-пушечного вооружения, подверженных в процессе работы циклическому ударному нагружению, необходимо учитывать тот факт, что в начальный период эксплуатации происходит процесс приработки деталей, при этом ближайшие окрестности контактирующих поверхностей подвергаются необратимому локальному деформированию.

Сказанное позволяет сделать вывод о необходимости разработки модели, достоверно прогнозирующей кинетику изменения параметров, характеризующих приработку контактирующих поверхностей в процессе эксплуатации.

Микронеровность моделируется сферическим элементом (рис. 1). Анализ волновых процессов в сферическом элементе проводится при следующих допущениях:

1) перемещение частиц стержня в продольном направлении есть функция только z и t, где z - продольная координата поперечного сечения сферического элемента, t - время;

2) уравнением движения, используемым для описания распространения волн в стержне, является его проекция на модельную ось сферического элемента.

При этом поперечные сечения сферического элемента, плоские до деформации, остаются плоскими в процессе её.

Эти допущения сводят процесс деформирования к распространению плоских продольных волн напряжений в сферическом элементе. Решение проводится в декартовой системе координат, причём ось z совпадает с продольной осью сферического элемента, а начало координат расположено на конце сферического элемента, подвергаемого динамическому нагружению.

Математическая модель, описывающая изменение высоты единичной микронеровности в процессе циклического ударного нагружения, представляет собой систему пяти дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа с начальными и граничными условиями для них, соответствующими задаче Гурса [1]:

$$\begin{cases} \rho\dfrac{\partial V}{\partial t}-\dfrac{\partial \sigma}{\partial z}=-\dfrac{\sigma}{S}\dfrac{\partial S}{\partial z} \\ \dfrac{\partial\ v(z,\ t)}{\partial\ x}-\dfrac{\partial\ \varepsilon\ (z,\ t)}{\partial\ t}=\ 0 \\ \dfrac{\partial\ \varepsilon(z,\ t)}{\partial\ t}\ -\dfrac{1}{E}\cdot\dfrac{\partial\ \sigma(z,\ t)}{\partial\ t}=\ \Phi\ \left(\sigma\left(z,\ t\right),\varepsilon\left(z,\ t\right)\right)H\left[\sigma(x,\ t)-f\left(\varepsilon\right)\right]. \end{cases} \quad (1)$$

где ρ - плотность материала стержня (принимается постоянной в процессе деформирования), г/см^3; σ и v - напряжение и скорость частиц стержня в поперечном сечении с координатой z в момент времени t соответственно, Н/м^2, м/с; $H\left(\xi\right)$ - единичная функция Хевисайда, отражающая упругий характер разгрузки; $f\left(\varepsilon\right)$ - функция, аппроксимирующая диаграмму статического нагружения.

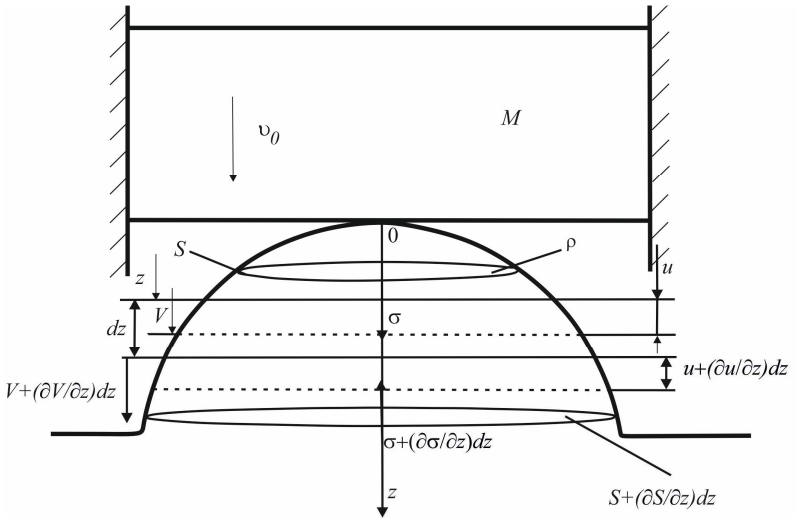


Рис. 1. Единичная микронеровность сферической формы

Система дифференциальных уравнений (1) относятся к гиперболическому типу, и их численное интегрирование целесообразно проводить методом характеристик с последующей конечно-разностной аппроксимацией дифференциальных соотношений между искомыми функциями $\sigma\left(z,t\right),\varepsilon\left(z,t\right),\upsilon\left(z,t\right)$ вдоль характеристических направлений. В рассматриваемом случае дифференциальные уравнения характеристик записываются так:

$$\begin{aligned} d\ z\ &= 0 \\ d\ z\ &= \pm\sqrt{\frac{E}{\rho}}d\ t \end{aligned} \quad (2)$$

Соответствующие системе (1) дифференциальные соотношения вдоль характеристик (2) имеют вид:

вдоль характеристики $d\,z=0$:

$$\frac{1}{E}d\sigma+d\varepsilon=-\Phi dt \quad (3)$$

– вдоль характеристики $d\ z\ =+\sqrt{\frac{E}{\rho}}d\ t$:

$$\frac{1}{E}d\sigma-\sqrt{\frac{\rho}{E}}dV=-\left(\Phi+\sqrt{\frac{1}{\rho E}}\left[\frac{\sigma}{S}\frac{\partial S}{\partial z}\right]\right)dt \quad (4)$$

– вдоль характеристики $d\ z\ = -\sqrt{\frac{E}{\rho}}d\ t$:

$$\frac{1}{E}d\sigma+\sqrt{\frac{\rho}{E}}dV=\left(\sqrt{\frac{1}{\rho E}}\left[\frac{\sigma}{S}\frac{\partial S}{\partial z}\right]-\Phi\right)dt\,. \qquad (5)$$

Результаты численных решений представлены на рис. 2 – 5. На рис. 2 отображено изменение остаточной деформации по сечениям микронеровности после четырех ударов. Полученные результаты демонстрируют, как меняется остаточная деформация после каждого удара, т.е. данный график иллюстрирует динамику процесса приработки.

Рис. 3 иллюстрирует изменение площади поперечного сечения микронеровности на переднем фронте ударной волны в процессе первого ударного нагружения при различных условиях нагружения.

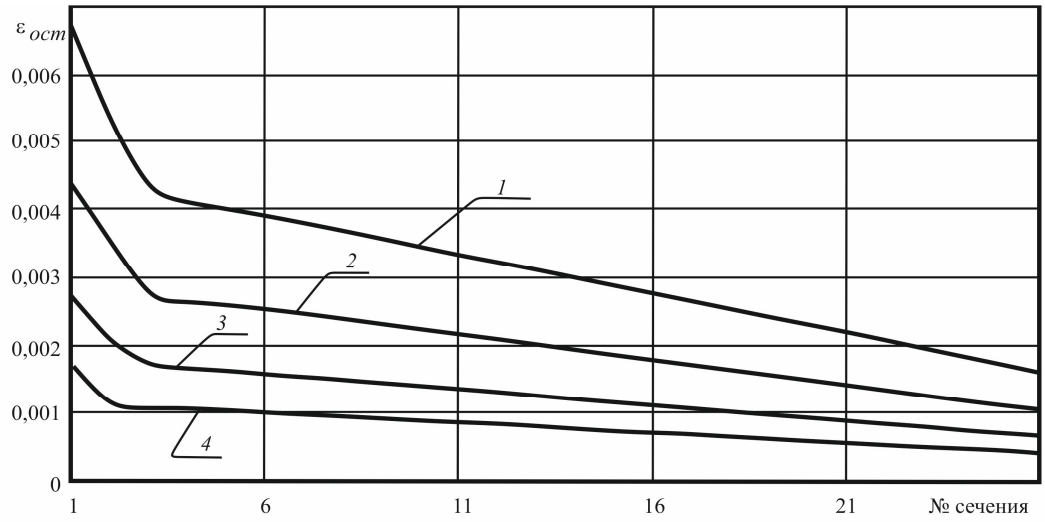


Рис. 2. Остаточная деформация по сечениям микронеровности после ударного Нагружения: материал – медь; начальное напряжение 600 Мпа; 1 – 1 удар; 2 – 2 удар; 3 – 3 удар; 4 – удар

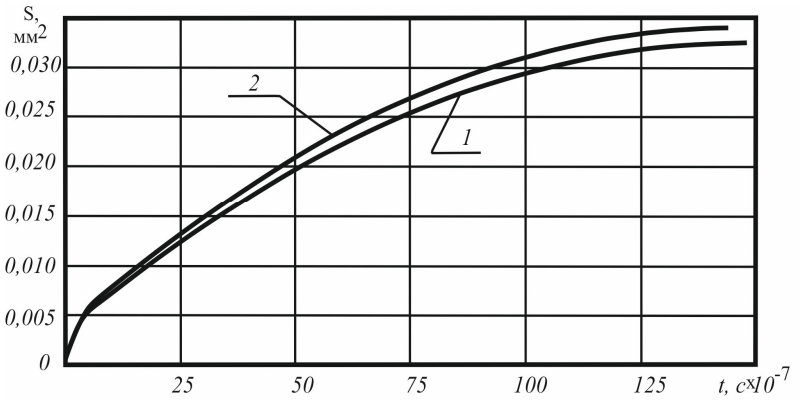


Рис. 3. Площадь поперечного сечения микронеровности на переднем фронте ударной волны в процессе ударного нагружения (первый удара): материал – медь; 1 - 600 МПа; 2 - 1500 МПа

На рис. 4 представлена площадь микронеровности после первого ударного нагружения.

Рис. 5 отображает процесс приработки при различных начальных условиях. Полученные результаты подтверждают предположение о существовании для различных начальных условий определенной величины равновесной микрогеометрии.

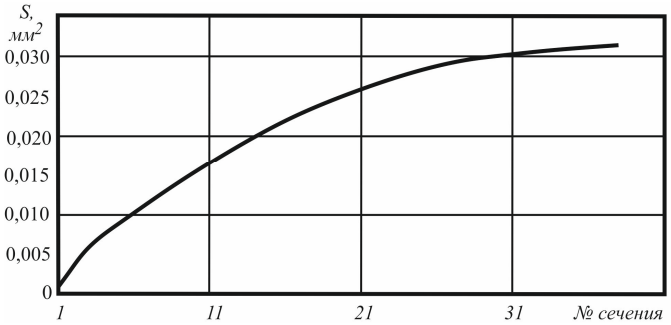


Рис. 4. Площадь поперечного сечения микронеровности по сечениям после ударного нагружения (первый удара): материал – медь

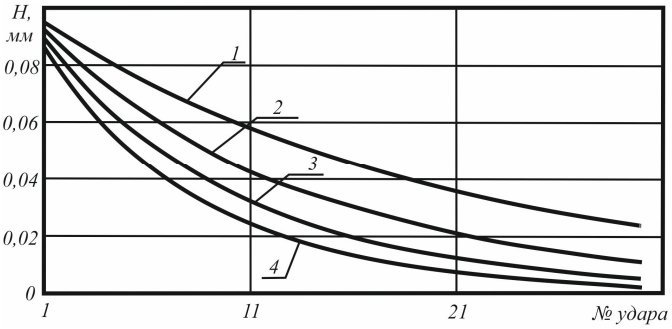


Рис. 5. Изменение высоты микронеровности в процессе циклического ударного нагружения: материал – медь; 1 - 600 Mпа; 2 - 900 Mпа; 3 - 1200 Mпа; 4 - 1500 МПа

Таким образом, использование предложенной модели (1) позволит отслеживать изменение не только высоты [2, 3, 4], но и площади поперечного сечения микронеровности в процессе циклического ударного нагружения. Что даст более полное представлении о площади контакта соударяющихся в процессе эксплуатации СПВ деталей.

Список литературы

1. Кукуджанов В.Н. Распространение упруго–пластических волн в стержне с учетом влияния скорости деформации // М.: Вычислительный центр АН СССР. 1967. 48 с.

2. Баранов В.Л., Тер-Данилов Р.А. Процесс формирования равновесной микрогеометрии при циклическом ударном нагружении // Известия Тульского государственного университета. Актуальные вопросы механики. 2005. С. 50 – 54.

3. Тер-Данилов Р.А. Теоретический анализ процесса контактной приработки при циклическом ударном нагружении // Известия Тульского государственного университета. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. 2006. С. 135 – 142.

4. Тер-Данилов Р.А., Плахов П.В., Людвик Р.Г. Образование полностью регулярного микрорельефа на поверхностях деталей стрелково-пушечного вооружения подверженных циклическому ударному нагружению // Материалы доклада VII региональной научно-технической конференции «Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов. Тула: ТулГУ. 2008. С. 103 - 108.

Баранов Виктор Леопольдович, д-р техн. наук, профессор, ivts-spv1411@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Тер-Данилов Роман Арустамович, канд. техн. наук, доцент, ivts-spv1411@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

SIMULATION OF THE DEFORMATION RESPONSE OF SPHERICAL SURFACE MICROGEOMETRY TO PULSE LOADING

V.L. Baranov, P.A. Ter-Danilov

The article solves the problem of shock loading of a single micro-roughness modeled by a spherical element, and sets the problem of spreading elastic-visco-plastic stress waves in the micro-roughness.

Key words: microgeometry, micro-roughness, break-in period.

Baranov Viktor Leopoldovich, doctor of technical sciences, docent, ivts-spv1411@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Ter-Danilov Roman Arustamovich, candidate of technical sciences, docent, ivts-spv1411@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.454.3

МЕТОДИКА РАСЧЕТА УНОСА МАССЫ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ЭЛЕМЕНТОВ СОПЛОВОГО БЛОКА

Л.В. Октябрьская, С.В. Минчук, М.С. Воротилин, Е.П. Поляков

Рассмотрены механизмы уноса композиционного материала теплозащитного покрытия элементов соплового блока при воздействии высокотемпературных тепловых потоков. Разработана методика расчета уноса массы: химического, механического и эрозионного; ввиду особенностей процессов позволившая провести моделирование в упрощенной постановке, доступной для инженерных расчетов.

Ключевые слова: композиционные материалы, скорость уноса, разгар, теплозащитные покрытия.

Скорость уноса углеродного композиционного материала, величина разгара рабочей поверхности элементов конструкции соплового блока практически полностью определяется его тепловым состоянием. Оно характеризуется сложным распределением температурных полей в конструктивных элементах соплового блока при наличии уноса массы композитов. Тепловое состояние конструкции соплового блока зависит от условий теплообмена и его видов. Определение температурных полей и уноса массы композитов производится путем применения различных математических моделей для соответствующего конструктивного элемента соплового блока.

Унос массы композиционного материалов элементов соплового блока энергетической установки необходимо рассматривать как совокупность термохимического и механического воздействия высокоэнтальпийного газового потока при наличии конденсированной фазы на поверхность материала. Суммарное значение скорости уноса массы имеет вид $\dot{m} = \dot{m}_X + \dot{m}_M + \dot{m}_Э$, где $\dot{m}_x$, $\dot{m}_м$ $\dot{m}_э$ - соответственно массовые скорости химического, механического и эрозионного уноса массы с единицы поверхности.

При решении задач исследования работоспособности композитов в конструкции двигателей обычно определяют унос массы как $\dot{m} = \int_0^{t_k} \dot{m} dt$, а при исследовании эрозионной стойкости элементов газовой полости сопла (разгар сечения сопла по длине)

определяют линейный унос массы по зависимости $u_w = \frac{1}{\rho \cdot S}\int_0^{t_k} \dot{m} dt$, где $\dot{m}$ - скорость уноса массы; t_k – время разрушения поверхности материала; S – площадь рабочей поверхности; ρ – плотность материала.

Модели окисления углеродных структур разработаны для графитов и пирографитов, а на углерод-углеродные композиции и углепластики их распространяют с незначительными модификациями [1].

Возможны три отличительных друг от друга режима окисления: кинетический, диффузионный и сублимационный, определяемые значениями температуры стенки и параметрами газового потока. В условиях энергетической установки на твердом топливе реализуются только два режима – кинетический и диффузионный.

Для кинетического режима характерно резкое увеличение скорости уноса с ростом температуры стенки. Механизм диффузионного горения углерода в многокомпонентном газе очень сложен, и расчеты массовой скорости окисления требуют использования моделей турбулентного пограничного слоя и значений коэффициентов диффузии, скоростей образования компонент и ряд других величин. Поэтому даже для замороженного пограничного слоя определить массовую скорость окисления каталитической стенки по закону Фика не всегда возможно в инженерных расчетах тепловой защиты.

В первом приближении можно вычислить массовую скорость окисления углерода в диффузионном режиме по зависимости $\dot{m} = \frac{\alpha}{C_p} B_m (Le_i)^{0,7}$, в котором в качестве массодвижущей силы используют параметр $B_m = M_c \sum_{i=1}^{n} \frac{c_i}{M_i}$ - окислительный потенциал продуктов сгорания (M_i, c_i – молярная масса и концентрация кислородосодержащих компонент); $Le_i = \frac{\rho \cdot D_i C_p}{\lambda}$ - число Льюиса.

Однако для многокомпонентной газовой смеси определение значения числа Льюиса является самостоятельной сложной задачей.

Для вычисления скорости химического уноса материала с поверхности, обусловленного конверсией углерода с поверхности в оксид углерода может быть использована модель Бояринцева-Звягина [1] для материалов на основе углерода.

Массовая скорость уноса углерода за счет взаимодействия с кислородосодержащими компонентами окружающей среды определяется по формуле:

$$\dot{m} = \left(\frac{\alpha}{C_P}\right)\frac{B_C}{(1-\vartheta_m)}, \quad (1)$$

где C_p – удельная теплоемкость окружающей среды при постоянном давлении; $\left(\frac{\alpha}{C_p}\right)$ – коэффициент массообмена; B_c – безразмерная скорость уноса, учитывающая три режима окисления углерода (кинетический, переходный, диффузионный) по мере роста температуры на границе расчетной области; υ_m – поправочный коэффициент, учитывающий долю химикомеханического выкашивания нагреваемой поверхности материала.

Величина B_c асимптотически приближается по мере роста температуры к значению окислительного потенциала окружающей среды и вычисляется по формуле:

$$B_C = \frac{\sqrt{\left(\left(\frac{M_C}{M_0}\right)\omega+1\right)+4B_m\left(\frac{M_C}{M_0}\right)\omega}}{2\left(\frac{M_C}{M_0}\right)\omega} - \frac{\left(\frac{M_C}{M_0}\right)\omega+1}{2\left(\frac{M_C}{M_0}\right)}, \quad (2)$$

где $B_m = M_C\left(\frac{C_{H_2O}}{M_{H_2O}} + \frac{C_{CO_2}}{M_{CO_2}}\right)$; $\omega = \left(\frac{\alpha}{C_P}\right)\left(\frac{T_W}{P_W}\right)\frac{1}{1{,}456K_0}\exp\left(\frac{E_0}{RT_W}\right)$; M_0 ,M_C , M_{H_2O} , M_{CO_2} – соответственно, молекулярные веса смеси газов продуктов сгорания , углерода, воды и углекислого газа; C_{H_2O} и C_{CO_2}- весовые концентрации воды и углекислого газа в газовом потоке; E_0 и K_0 – энергия активации и предэкспоненциальный множитель в законе Аррениуса для константы скорости реакции CO_2 и H_2O с углеродом; R = 8,314 кДж/кМоль·К; P – давление в рассматриваемом сечении проточного тракта сопла в Па. Индекс w обозначает величину соответствующих параметров газа на стенке.

Значение энергии активации для всех углеродных материалов составляет $E_0 = 0{,}171\cdot10^7$ кДж/кМоль, а молекулярный вес углерода M_C = 12,011кг/кМоль.

Подставляя значения E_0, R, и M_C в вышеуказанные формулы, получаем следующие расчетные зависимости:

$$B_C = \frac{1}{2}R_m\left(\sqrt{(R_m+1)^2 + 4B_mR_m} - (R_m+1)\right); \quad (3)$$

$$R_m = 8{,}2\left(\frac{\alpha}{C_P}\right)\left(\frac{T_W}{P_W}\right)\frac{1}{M_0K_0}\exp\left(\frac{20568}{T_W}\right). \quad (4)$$

Учитывая, что давление P_w обычно задается в МПа, получаем

$$B_C = \sqrt{B_{C1}^2 + B_{C2}^2} - B_{C1};\ B_{C1} = 0{,}5 + 0{,}5\cdot10^6\frac{1}{R_m};\ B_{C2} = 0{,}1\cdot10^7\frac{B_m}{R_m}$$

Зависимости (1) - (4) описывают кинетический, переходный и диффузионный режимы окисления углерода, и при высоких температурах поверхности стенки T_w значение параметра B_c асимптотически стремится к значению окислительного потенциала газовой смеси B_m. Для проведения расчетов по такой модели необходимо решение краевой задачи теплопроводности, знание констант кинетики окисления материалов (предэкспоненциальный множитель K_0 и аналог энергии активации E), установить условия теплообмена между продуктами сгорания и поверхностью стенки.

Структурные особенности углерода поверхностного слоя углеродных композитов (размеры частиц, пористость, технологические параметры изготовления и др.) приводят к широкому диапазону экспериментально определенных значений предэкспоненциального множителя K_0. Эти значения отличаются на три порядка.

При воздействии на композиционный материал потока горячих газов происходит разложение органического связующего вещества. Разложение связующего сопровождается поглощением тепла, приводит к образованию значительных масс газообразных продуктов разложения и соответственно формирует пористую, сильно изрытую структуру поверхностного слоя. Стенки пор и внутренних каналов представляют собой спеченные и частично разрушенные волокна наполнителя, между которыми распределены твердые частицы второго конечного продукта термического разложения (пиролиза) органического связующего.

Учитывая, что несущие конструкционные слои надежно функционируют в условиях действия тепловых нагрузок лишь при низких температурах, то очевидно первой принципиальной особенностью теплозащитных покрытий является достаточно высокий перепад температур по их толщине. Поэтому при расчете прогрева конструкции необходимо учитывать зависимость теплофизических характеристик теплозащитных материалов от температуры.

На характеристики некоторых теплозащитных устройств и агрегатов ЭУ в значительной степени влияет изменение скорости и температуры теплоносителя, что приводит к существенным колебаниям тепловой нагрузки. При этом изменяется тепловой режим поверхностного слоя - режим становится нестационарным. С точки зрения расчета указанная особенность требует привлечения уравнений теплопроводности, численное решение которых достаточно трудоемко даже для современных ЭВМ.

Большинство теплозащитных покрытий основано на использовании принципа разрушения поверхностного слоя ради создания благоприятного теплового режима внутренних слоев или конструкции в целом. Разрушение или унос массы с поверхности влияет на процесс распространения тепла внутри теплозащитного покрытия. Уравнение скорости перемещения внешней границы тепла позволяет обеспечить квазистационарный режим прогрева материала. С другой стороны, перемещение внешней границы делает неопределенным постановку одного из граничных условий, что осложняет численные расчеты.

И, наконец, композиционные теплозащитные материалы ставят перед исследователями большой круг задач, связанных с внутренними физико-химическими превращениями. Все эти задачи приходится рассматривать наряду с перечисленными проблемами, что требует привлечения современных методов физического и математического анализа, результаты которого достаточно трудно численно обобщить даже с использованием современных ЭВМ.

Математическая модель, используемая при расчете нестационарного прогрева композиционных теплозащитных материалов, имеет много общего с известными законами сохранения массы, импульса и энергии в многокомпонентных реагирующих системах. В этой связи применительно к теплозащитным покрытиям общая система уравнений может быть несколько упрощена. Специфика работы теплозащитных покрытий позволяет использовать одномерную постановку задачи, т. к. глубина прогрева существенно меньше характерного размера тела. В сложных элементах конструкции, где возможен пространственный характер растекания тепла, вопрос об использовании одномерной постановки требует дополнительного обоснования.

Теплозащитные покрытия обладают относительной пористостью и большим содержанием органических компонентов, являющихся источником образования коксового газа. Поэтому средняя скорость фильтрации этих газов внутри прококсованного слоя превышает диффузионные потоки, направленные к внешней поверхности, поэтому последними можно пренебречь.

Общепринятыми допущениями являются отбрасывание в уравнениях тех членов, которые учитывают гидравлическое сопротивление пористого каркаса, возможность накопления массы газа внутри, работу сил давления, а также кинетическую энергию газа по сравнению с его теплосодержанием. Вместо уравнения сохранения импульса обычно используют закон Дарси. Объемная и поверхностная плотность отождествляются.

Ввиду малых размеров пор часто полагают, что в любой точке покрытия соблюдается равенство температур твердого остатка и просачивающегося через него газа. Это допущение является менее обоснованным, однако, учитывая высокие температуры, допускают, что конвективные теплообмены в порах достаточно интенсивны, чтобы обеспечить локальное температурное равновесие.

Наконец, принято объединять в одном коэффициенте суммарный коэффициент молекулярного и радиационного переноса тепла. Такое объединение возможно лишь потому, что размер пор достаточно мал по сравнению с глубиной прогрева, поэтому перепад температур на стенках пор слабо зависит от изменения внешних условий [2, 3].

Особенностями ЭУ снарядов СЗО является относительно небольшая продолжительность их работы (не более 7…10 с.). А исследования значений параметров химического уноса углеродных композиций в окрестности минимального сечения сопла при различных давлениях торможения показывают, что для углеродной композиции даже при давлении 12 МПа диффузионный режим уноса не наступает к 60 секунде работы ЭУ, а реализуется кинетический режим окисления.

Рассмотренные особенности функционирования углеродных композиционных материалов в конструкциях ЭУ снарядов СЗО показывают, что нельзя исключать возможность решения задачи определения массовой скорости уноса углерода в упрощенной постановке, доступной для инженерных расчетов. Рассмотрим такую возможность.

В исследованиях теплообмена при наличии химических реакций часто пользуются безразмерным коэффициентом переноса тепловой энтальпии (число Стантона):

$$St = \frac{q_w}{\rho_e V_e (I_e - I_w)}. \quad (5)$$

Для характеристики переноса массы обычно используется параметр:

$$B' = \frac{(\rho \cdot u)_w}{\rho_e V_e St}. \quad (6)$$

В это выражение входит значение *St*, определяемое по величине теплового потока к поверхности с учетом вдува массы в пограничный слой. Наряду с B' используется так называемый параметр вдува:

$$B = \frac{(\rho \cdot u)_w}{\rho_e V_e St_0}, \quad (7)$$

куда входит значение St_0, рассматриваемое для теплопередачи без вдува массы.

Энергия, поглощаемая при абляции в единицу времени, равна разности тепловых потоков:

$$u_w \rho \cdot Q_w = q_1 - q_2, \quad (8)$$

где q_1 – поток, подведенный к поверхности; q_2 – поток, отведенный вглубь материала; u_w – линейная скорость абляции, т.е. скорость перемещения аблирующей поверхности вглубь материала. Тепловой поток, отводимый вглубь покрытия, можно с учетом формул (5), (6) и (8) представить в виде:

$$B' = \frac{I_e - I_{w\Gamma}}{Q_w + c_T (T_w - T_н)}.$$

Поскольку $B/B' = St/St_0$, получим:

$$\frac{St}{St_0} = B\left[\frac{Q_w + c_T (T_w - T_н)}{I_e - I_{w\Gamma}}\right]. \quad (9)$$

Экспериментальные исследования показывают, что при фиксированных значениях критериев подобия *Re* и *Pr* величина St/St_0 может быть представлена в виде функции одного переменного *B*.

Зависимость отношения St/St_0 от параметра вдува можно аппроксимировать формулой $St/St_0 = A \cdot B^{-m}$. При использовании этой зависимости в широком диапазоне изменения параметра вдува невозможно подобрать постоянные значения *A*и *m* для всех значений *B*. Весь диапазон приходится делить на отдельные участки и для каждого из них принимать свои значения *A* и *m*. Рекомендуют для области низких значений $B < 2$ $A = 0{,}66$; $m = 0{,}41$. Для области $5 \le B \le 100$ рекомендуют $A = 1{,}2$; $m = 0{,}77$. Если полагать область изменения *B* заданной, т.е. значения *A*и *m* известными, то расчет уноса массы покрытия сводится к решению двух уравнений:

$$St/St_0 = A \cdot B^{-m}; \quad St/St_0 = B/B',$$

откуда $B = (A \cdot B')^{\frac{1}{1+m}}$. Поскольку выражение (3) можно представить в виде: $B = \frac{c_p}{\alpha_0} m_w$, массовая скорость уноса определится зависимостью:

$$\dot{m}_w = \frac{\alpha_0}{c_p}\left[A\frac{c_p(T_0 - T_w)}{c_T\left(T_w - T_н + \frac{Q_w}{c_T}\right)}\right]^{\frac{1}{1+m}}. \quad (10)$$

При наличии лучистого потока тепла к поверхности покрытия $q_л$ выражение для B' приобретает вид:

$$B' = \frac{I_e - I_{wI}}{Q_w + c_T(T_w - T_н) - q_л/\dot{m}_w}.$$

При этом линейная скорость уноса рассчитывается по приближенной зависимости:

$$u_w = \frac{\alpha_0}{\rho_T c_p}\left[A\frac{c_p(T_0 - T_w)}{c_T\left(T_w - T_н + \frac{Q_w}{c_T}\right)\left(1 - \frac{\alpha_л}{\alpha_0 + \alpha_л}\right)}\right]^{\frac{1}{1+m}}. \quad (11)$$

Таким образом, определяющим при оценке химического уноса массы углеродных материалов в химически активных газовых потоках является знание температуры реагирующей поверхности аблирующего материала. Температуру реагирующей поверхности стенки материала можно определить из уравнения теплового баланса

$$\frac{\alpha_0}{c_p}(I_e - I_w) + \alpha_л(T_0 - T_w) - \varepsilon\sigma \cdot T_w^4 = -\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial \delta}\right)_w + \dot{m}_w Q_w, \quad (12)$$

где $\alpha_л$ – коэффициент радиационного теплообмена; ε – степень черноты материала поверхности; σ – постоянная Стефана-Болцмана; δ – толщина прогреваемой стенки; λ – коэффициент теплопроводности материала; Q_w – тепловой эффект реакции окисления углерода компонентами газового потока. Основную трудность расчета T_w вызывает вычисление величины $\lambda\left(\partial T / \partial\delta\right)_w$, выполняемое при решении задачи прогрева.

Уравнение (12) аналитически неразрешимо. Для ориентировочных расчетов температуры поверхности можно воспользоваться следующими соображениями. Принимая во внимание относительно малое значение линейной скорости уноса для углеродных материалов при их высоких значениях температуропроводности, можно считать, что ярко выраженная нестационарность прогрева имеет место на малых промежутках времени прогрева и уноса массы. Температуру слоев материала, примыкающих к поверхности, допустимо считать равной температуре поверхности разрушающейся стенки.

Кинетика механического уноса до настоящего времени изучена еще недостаточно. Механическое воздействие газового потока на поверхность материала проявляется по крайней мере двойственным образом. Во-первых, давление скоростного напора является распределенной поверхностной нагрузкой, вызывающей напряжения сдвига частиц материала в поверхностном слое или изгибные напряжения элементов шероховатости, выступающих за пограничный слой.

Во-вторых, течение продуктов сгорания в турбулентном пограничном слое можно рассматривать как стационарное, повторяющееся с определенной частотой и амплитудой. Такое течение возбуждает в материале волновое движение и соответственно напряжение растяжения и сжатия, уровень которых может превосходить их предельные значения, что обусловит унос массы материала. Механизм механического уноса массы, обусловленный волновым давлением в материале, представляется наиболее предпочтительным.

При воздействии импульса силы при средней силе удара массы газа m за время воздействия τ в материале возникают продольные волны, связанные с давлением во фронте волны. Если за время $t = \tau$ происходит разрушение слоя поверхности материала δ, то давление в слое составит:

$$P_B = \rho\frac{\delta}{\tau}\left[\frac{E_C}{\rho}\cdot\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}\right]^{\frac{1}{2}} = C_f P_q \beta_M ,$$

где $\rho\,\delta/\tau = \dot{m}_м$ - массовая скорость механического уноса; β_M –коэффициент, учитывающий рассеяние энергии потока; P_q – скоростной напор потока; μ – коэффициент Пуассона; E_c –текущий модуль упругости при растяжении или сжатии материала; C_f – коэффициент сопротивления трения, определяемый формулой Прандтля-Шлихтинга.

С учетом отмеченного выражение массовой скорости уноса материала принимает следующий вид:

$$\dot{m}_м = 10^6 \beta_M P_q\left(\frac{0{,}316}{\mathrm{Re}^{1/3}} + 1{,}3\cdot 10^{-3}\right)\left[\frac{E_C(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}\right]^{1/2}. \qquad (13)$$

Необходимо оговорить, что уравнение (13) следует использовать при условии $f(\dot{m}_м) \geq 1$. Если условием механического разрушения слоя считать превышение амплитуды смещения частиц материала над его предельными деформациями, то получим:

$$f(\dot{m})\frac{|E_C|}{\dot{m}_м\left\{\frac{\lfloor E_C \rfloor}{\rho}\cdot\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}\right\}^{1/2}} \geq 1. \qquad (14)$$

Таким образом, условие (14) является необходимым условием механического уноса массы. При $f(\dot{m}_м) < 1\ \dot{m} = 0$.

Для графитовых материалов присуще химико-механическое выкрашивание элементов шероховатости вследствие различной скорости окисления связующего и наполнителя. Доля механического выкрашивания в суммарной скорости уноса массы определена выражением:

$$\eta = 1.85\frac{\varphi_н}{\overline{\rho}}\left(\frac{1-\overline{\rho}}{1-\varphi_н}\right)^3 F\left(\frac{\rho_e V_e^2}{\sigma_в}\right),$$

где $\varphi_н$ –массовая доля наполнителя; $F(x)$ – функция учета силового фактора; $\overline{\rho}$ - отношение средней плотности графита к плотности кокса-наполнителя.

Суммарная скорость уноса массы графита учитывает химическую и механическую составляющие уноса в виде: $\dot{m}_х + \dot{m}_м = \dfrac{\dot{m}_х}{1-\eta}$.

Из опытных данных следует, что для графитов и пирографитов $\eta < 0{,}1$, а для углепластиков с ориентацией наполнителя параллельно оси сопла $\eta \approx 0{,}15$.

Несмотря на многообразие методических подходов к решению задач оценки эрозионного уноса массы материалов, точность расчетов все еще остается низкой. С учетом этого положения предлагается следующий метод оценки эрозионного уноса массы углеродных материалов при взаимодействии поверхности с конденсатом газового потока, падающего на поверхность под углом α.

Допустим, что число ударов частиц по элементарной площадке на поверхности КМ достаточно велико. Чтобы формализовать это допущение, введем новый параметр воздействия – коэффициент перекрытия $K_ч$, равный отношению площади миделевого сечения всех частиц, выпавших на поверхность КМ, к площади этой поверхности S_N:

$$K_ч = \sum_{N_ч} S_{чi} / S_N .$$

У сферических частиц с диаметром $d_ч$ площадь миделя $S_{pl} = \pi d_ч^2 / 4$. Поэтому при заданной плотности $d_ч$, измерив массу всех выпавших на единицу площади частиц $m_ч$, можно рассчитать коэффициент перекрытия:

$$K_ч = N_ч \frac{\pi d_ч^2}{4} / S_N = \left(\frac{3}{2} m_ч\right) / \left(\rho_ч d_ч\right). \quad (15)$$

Все последующие рассуждения основываются на том, что коэффициент перекрытия имеет порядок единицы для заданного конечного интервала времени воздействия многофазного потока на КМ. В этом случае многофазный (или гетерогенный) поток можно свести к квазигомогенной среде, имеющей тем не менее свои отличительные особенности рассеяния энергии на поверхности КМ.

Запишем баланс энергии на разрушающейся поверхности КМ (рис. 1).

$$E_ч = G_ч \frac{V_ч^2}{2} = G_ч \Delta Q_ч + G_{er} \Delta Q_{er} + E_r + E_d + E_в . \quad (16)$$

Здесь $G_ч$ – плотность потока массы частиц; G_{er} – массовый расход вещества с единицы площади поверхности КМ. В общем случае, энергия $E_ч$, подведенная к поверхности КМ в гетерогенном потоке, должна учитывать не только кинетическую энергию частиц, но и то изменение их энтальпии, которое имеет место при контакте с КМ: $G_ч c_ч \left(T_{ч0} - T_n\right)$. Однако вклад этой составляющей потока энергии будет тем меньше, чем выше скорость $V_ч$. Отраженная часть энергии E_r определяется возможностью упругого отскока частиц.

Эксперименты показывают, что для подавляющего большинства соударяющихся тел коэффициент восстановления скорости при отскоке экспоненциально убывает с ростом скорости удара $V_ч$.

При высокой концентрации частиц в потоке может иметь место, так называемый, эффект блокирования. Перед поверхностью КМ при этом образуется слой отраженных частиц, которые поглощают (блокируют) часть энергии потока частиц $E_в$.

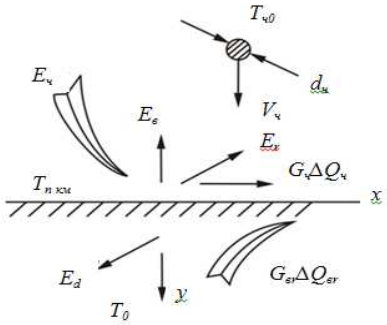


Рис. 1. Баланс энергии на разрушающейся поверхности

В установившемся режиме разрушения, когда линейная скорость перемещения внешней поверхности уравнивается со скоростью перемещения волны прогрева, слагаемое теплового баланса E_d определяет изменение теплосодержания, обусловленное прогревом подповерхностных слоев разрушаемого КМ: $E_d \approx G_{er} c_{км} \left(T_n - T_0\right)$.

Проводя оценку возможных скоростей удара частиц о поверхность КМ, можно установить диапазон скоростей, в котором происходит переход от упругого к полностью пластическому взаимодействию: $V_C \le V_ч \le V_ч^*$. Здесь V_c – условная граница начала эрозионного разрушения КМ в гетерогенном потоке; $V_ч^*$ - так называемое пороговое значение скорости удара, выше которого эффекты упругости пренебрежимо малы по сравнению с другими слагаемыми баланса энергии.

Если $V_c > V_ч^*$, а процессы разрушения самих частиц и блокирования не учитывать, то из баланса энергии вытекает:

$$g = \frac{G_{er}}{G_ч} = \frac{V_ч^2 - 2G_ч \Delta Q_ч}{2H_{er}},$$

где $H_{er} = c_{км}(T_п - T_0) + \Delta Q_{er}$ - эффективная энтальпия эрозионного разрушения, является фундаментальной характеристикой эрозионной стойкости КМ.

В диапазоне $V_C < V_ч < V_ч^*$ удобно описать безразмерную интенсивность эрозии соотношением:

$$g = \eta \frac{V_ч^2 - 2G\ \Delta Q}{2H_{er}}. \qquad (17)$$

Коэффициент η определяет степень преобразования кинетической энергии потока частиц в энергию разрушения. И наконец, в диапазоне $V_ч < V_C$ эрозия протекает столь слабо, что можно принять $g = 0$.

Если плотность потока частиц настолько мала, что за все время эрозионного воздействия кратеры от ударов на поверхности КМ не перекрываются ($K_ч$<1), процесс разрушения будет протекать в неустановившемся режиме, и каждый удар частицы будет независимым событием.

Ограничимся рассмотрением удара частицы по нормали к поверхности КМ ($\theta_ч = 90^0$).

Проникание высокоскоростной частицы в КМ имеет некоторые общие физические черты с внедрением струи несжимаемой жидкости в полубесконечное пространство, заполненное другой несжимаемой жидкостью. Обращая движение, получим, что КМ набегает на неподвижную контактную поверхность со скоростью *u*, а частица – со скоростью *V*, причем:

$$V = V_ч - u.$$

Для установившегося движения из интеграла Бернулли для несжимаемой жидкости получим для скорости внедрения:

$$u = V_ч / \left(1 + \sqrt{\rho_{км} / \rho_ч}\right).$$

Скорость проникновения всегда меньше скорости соударения; в частности; если КМ и частица имеют одинаковую плотность, то скорость проникновения вдвое меньше $V_ч$.

Глубина кратера $h = ut$ может быть определена исходя из условия полного расхода массы частицы за время $t = l_{чо} / V = l_{чо} \sqrt{\rho_ч / \rho_{км}} \frac{1}{u}$. Откуда, $h = t \cdot u = l_{чо} \sqrt{\rho_ч / \rho_{км}}$.

При относительно низких скоростях соударения, менее 1000 м/с можно допустить, что в течение всего процесса внедрения частица не изменяет своей формы и массы. Тогда глубина максимального внедрения частицы описывается следующим выражением:

$$(h / d_ч) = (\rho_ч / \rho_{км})(k / c_D) \ln\left|1 + \left(c_D \rho_{км} V_ч^2\right) / (2H_1)\right|, \qquad (18)$$

где $k = l_ч / d_ч$ - относительное удлинение частицы цилиндрической формы. Коэффициент сопротивления c_D можно оценить по формуле Ньютона $c_D = 2\sin^2\theta$.

Если глубина кратера $(h / d_ч) \le 0{,}5$, то зависимость ее от скорости внедрения будет описываться формулой:

$$(h / d_ч)^2 = \frac{2}{3} \frac{\rho_ч}{\rho_{км}} \frac{1}{c_D} \ln\left(1 + \frac{c_D \rho_{км}}{4H_1} V_ч^2\right). \qquad (19)$$

Сравним варианты формы частиц при относительно малых глубинах кратеров. Ограничимся первым членом разложения. Для цилиндрической частицы имеем: $(h/d_ч)_ц = [(k\rho_ч)/(2H_1)]\cdot V_ч$, а для сферической $(h/d_ч)_{сф} = \sqrt{\rho /(6H_1)}\cdot V_ч$. Эта зависимость подтверждается экспериментально (рис. 2). Не случайно ее нередко используют для определения динамической твердости материала преграды H_1. Динамическая твердость является практически постоянной величиной, полностью характеризующей динамику ударного сопротивления материала. Динамическая твердость H_1 превышает твердость по Бринеллю *HB*, как правило, в 1,5…2 раза.

Если принять, что масса цилиндрической и сферической частиц одинакова, что возможно при $k = (l_ч/d_ч) = 2/3$, то получим: $(h/d_ч)_ц = 2(h/d_ч)_{сф}$.

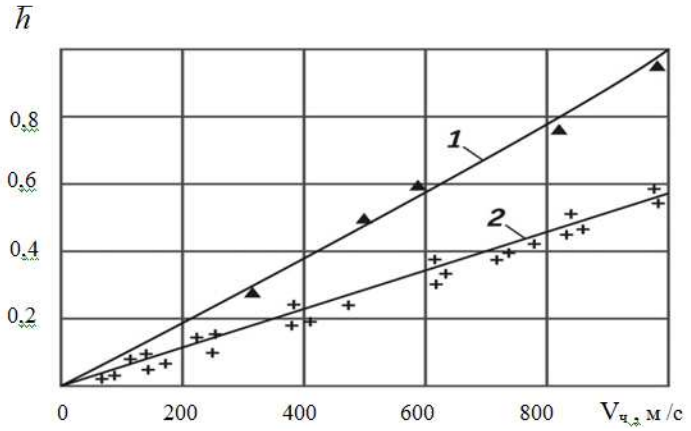


Рис. 2. Зависимость относительной глубины кратера от скорости удара: 1 – материал КМ – Al, частиц – сталь; 2 - материал КМ – Д-16, частиц – стекло

Удар под косым углом может быть приведен к некоторому нормальному удару, для которого $V'_ч$ соответствует нормальной составляющей скорости косого: $V'_ч(\theta = 90^o) = V_{чn} = V_ч \sin\theta$; $h(\theta) = h(90^o)\sin\theta$.

Давление частицы на пятно контакта пропорционально квадрату скорости соударения $V_ч$ и обратно пропорционально площади пятна $S_ч/p \approx \left(V_ч^2/S_ч\right)$. Площадь патна контакта сферической частицы зависит от глубины внедрения *h*: $S_ч = \pi d_ч h(d_ч - h) = \pi d_ч{}^2 x(1-x)$ при $x = \left(h/d_ч\right) < 0{,}5$. С другой стороны глубина внедрения линейно зависит от скорости соударения сферических частиц $x = f/d_ч = \sqrt{\rho_ч/(gH_1)}V_ч$, $H_1 \approx 2HB$, где *HB* – «паспортная» твердость по Бринеллю. Поэтому давление на пятне контакта изменяется с увеличением скорости подобно функции $p \approx V^2/S \approx x^2/[(1-x)x] = x/(1-x)$, которая претерпевает резкое изменение темпа роста в окрестности точки x = 0,25. Отношение унесенной массы ко всей массе вещества в объеме кратера составляет около 0,15, поэтому относительная глубина внедрения, равная 0,25, соответствует безразмерной скорости разрушения $G_{et} \approx 10^{-3}$. Оба эти признака однозначно характеризуют критическое значение скорости частиц, при которой начинается эрозия материала $V_ч = V_c$.

Приближенное соотношение для критической скорости имеет вид:

$$V_c = \left(\frac{3}{8}\cdot\frac{H_1}{\rho_ч}\right)^{0,5} \approx 0,2\sqrt{\frac{H_{et}\rho_e}{\rho_c}}\left[\frac{м}{c}\right].$$

С учетом отмеченного в качестве аппраксимационной зависимости между интенсивностью эрозионного разрушения и скоростью удара, справедливой в диапазоне $V_ч \geq V_c$, можно использовать

$$g = \frac{G_{er}}{G_ч} = \eta\frac{V_ч^2}{2H_{et}}\left[1-\exp\left(\frac{V_c - V_ч}{0,5V_c}\right)\right] \text{ при } V_ч \geq V_c \qquad (20)$$

Таким образом, получены основные зависимости уноса массы композиционного материала элементов соплового блока, а именно: химический, механический и эрозионный.

Разработан комплекс математических моделей для создания методики расчета уноса массы композиционного материала. Рассмотренные особенности позволили решение задачи определения массовой скорости уноса углерода рассматривать в упрощенной постановке, доступной для инженерных расчетов.

Список литературы

1. Бояринцев В.И., Звягин Ю.В., Исследования разрушения углерафитовых материалов при высоких температурах. ТВТ. Т. 13. № 5, 1975.

2. Тровимович М.А., Галигузов А.А., Юрков А.Л., Малахо А.П., Авдеев В.В., Октябрьская Л.В., Лепин В.Н., Макаровец Н.А. Термостойкость волокнистых реактопластов в условиях высоких температур // Химические волокна. № 6. 2017. С. 16-22.

3. Тровимович М.А., Галигузов А.А., Юрков А.Л., Малахо А.П., Октябрьская Л.В., Минчук С.В. Высокотемпературные превращения в волокнисто-полимерных композиционных материалах при абляционных испытаниях // Новые огнеупоры. № 8. Москва: Изд-во ООО «Функциональные материалы». 2018. С. 43-48.

Октябрьская Лариса Владимировна, начальник управления, oktyabrskaya.lv@splavtula.ru, Россия, Тула, АО «НПО «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева»,

Минчук Сергей Викторович, канд. техн. наук, начальник отдела, minchuk.sv@splavtula.ru, Россия, Тула, АО «НПО «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева»,

Воротилин Михаил Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе, info@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Поляков Евгений Павлович, доктор технических наук, info@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

METHOD FOR CALCULATING THE CARRYOVER OF THE MASS OF THE COMPOSITE MATERIAL OF THE ELEMENTS OF THE NOZZLE BLOCK

L.V. Oktyabrskaya, S. V. Minchuk, M. S. Vorotilin, E.P. Polyakov

The mechanisms of the carryover of the composite material of the heat-protective coating of the nozzle block elements under the influence of high-temperature heat fluxes are considered. A method for calculating mass carryover wasdeveloped: chemical, mechanical and erosion, due to the peculiarities of the processes, which made it possible to carry out modeling in a simplified formulation, available for engineering calculations.

Key words: composite materials, drift rate, high, heat protective coatings.

Oktyabrskaya Larisa Vladimirovna, department manager, oktyabrskaya.lv@splav-tula.ru, Russia, Tula, JSC «SPLAV Scientific and Production Association» named after A. Ganichev»,

Minchuk Sergey Victorovich, candidate of engineering sciences, department manager, minchuk.sv@splavtula.ru, Russia, Tula, JSC «SPLAV Scientific and Production Association» named after A. Ganichev»,

Vorotilin Mihail Sergeevich, doctor of technical science, professor, vice-rector for research, info@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Polyakov Evgeniy Pavlovich, doctor of technical science, professor, info@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.735.34

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ХОЛОДНОГО РАДИАЛЬНОГО ОБЖАТИЯ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ ИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

В.М. Лялин, Р.А. Сидоров, С.М. Зыков

Осуществлено исследование силовых характеристик операции высокоскоростного холодного радиального обжатия трубной заготовки на оправке, обосновывающее возможность реализации операции в перспективной технологии изготовления труб из конструкционной легированной стали, функционирующих в условиях высоких импульсных термодинамических нагрузок, с привлечением инженерного метода расчета.

Ключевые слова: полугорячая штамповка выдавливанием, высокоскоростное радиальное обжатие, конструкционная легированная сталь, интенсивность деформации, удельное усилие.

В настоящее время существует множество способов получения труб из конструкционных легированных сталей, функционирующих в условиях высоких импульсных термодинамических нагрузок, каждый из которых имеет недостатки, связанные либо с заготовкой для изготовления трубы, либо с самой технологией изготовления. Такими недостатками могут быть: неоднородная, крупнозернистая, с множеством дефектов структура материала заготовки, и как следствие, структура готовой трубы, значительный отход материала, низкое качество поверхности и др. [1].

В связи с этим актуальной задачей является разработка новой технологии изготовления труб из указанных сталей, функционирующих в условиях высоких импульсных термодинамических нагрузок, исключающей указанные недостатки. Перспективной является технология, предусматривающая реализацию двухпереходной полугорячей штамповки выдавливанием и последующего высокоскоростного холодного радиального обжатия на оправке. Двухпереходная полугорячая штамповка выдавливанием обеспечивает мелкозернистую структуру с «залеченными» микро- и макродефектами [2], повышение механических свойств материала трубного полуфабриката и исключение необходимости проведения дополнительной операции полного рекристаллизационного отжига, с целью подготовки полученного полуфабриката к последующей операции [3]. Высокоскоростное холодное радиальное обжатие придаст детали требуемую геометрию, обеспечив высокую чистоту поверхности и повышение механических свойств материала трубы [1].

Реализация указанной перспективной технологии требует предварительного теоретического исследования ключевых операций, в частности, обоснования возможности реализации операции высокоскоростного холодного радиального обжатия на оправке.

В работе изложены результаты исследования силовых характеристик операции высокоскоростного холодного радиального обжатия на оправке в технологии изготовления трубы, функционирующей в условиях высоких импульсных термодинамических нагрузок. Исходной заготовкой является трубная заготовка из стали марки 30ХН2МФА, полученная в результате проведения двухпереходной полугорячей штамповки выдавливанием (рис. 1).

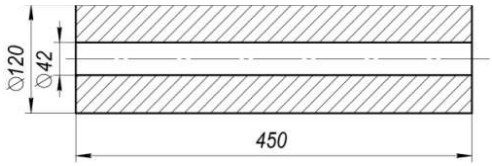


Рис. 1. Трубная заготовка

Для наиболее благоприятного проведения операции высокоскоростного холодного радиального обжатия трубной заготовки на оправке односторонний зазор между заготовкой и оправкой не должен превышать 1,5 мм [4].

Операция высокоскоростного холодного радиального обжатия на оправке в технологии изготовления трубы в рассматриваемом случае в соответствии с проведенным расчетом включает четыре перехода.

Расчетная схема деформирования трубной заготовки при реализации высокоскоростного холодного радиального обжатия представлена на рис. 2.

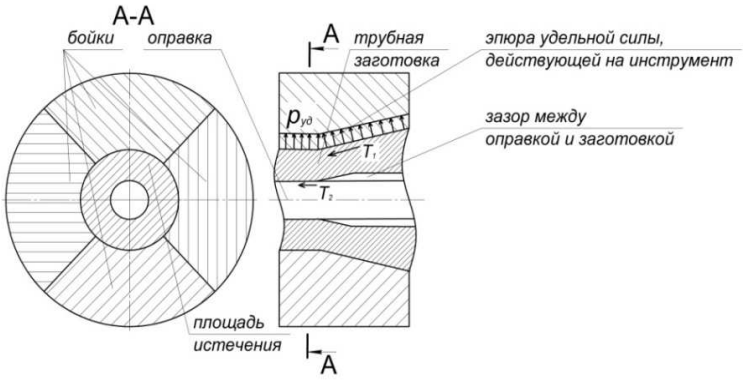


Рис. 2. Расчетная схема деформирования трубной заготовки при реализации высокоскоростного холодного радиального обжатия: T_1 - трение между заготовкой и бойком; T_1 - трение между заготовкой и оправкой; T_1 – удельная сила

Максимальная интенсивность деформации на первом переходе операции наблюдается в зоне обжатия полуфабриката трубы без зазора между оправкой и полуфабрикатом трубы (рис. 3), поскольку именно этому участку соответствует минимальное значение толщины стенки полуфабриката трубы, полученного после реализации первого перехода высокоскоростного холодного радиального обжатия:

$$e_1 = ln\frac{F_1}{F_2} = ln\frac{9919{,}26}{6782{,}4} = 0{,}38,$$

где e_1 – максимальная интенсивность деформации на первом переходе; F_1–площадь поперечного сечения трубной заготовки, мм^2; F_2 – минимальная площадь полуфабриката трубы, полученного после первого перехода высокоскоростного холодного радиального обжатия, мм^2.

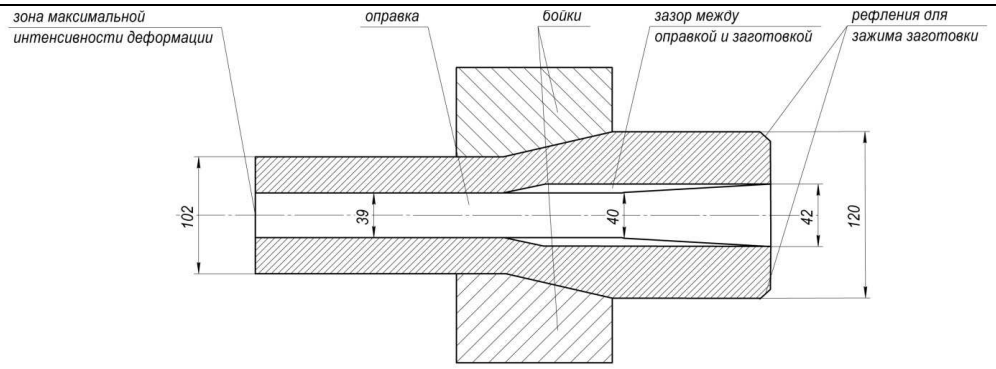


Рис. 3. Первый переход высокоскоростного холодного радиального обжатия

Максимальная интенсивность деформации на втором и третьем переходах высокоскоростного холодного радиального обжатия на оправке в технологии изготовления трубы также наблюдается в зоне обжатия полуфабриката трубы без зазора между оправкой и полуфабрикатом трубы (рис. 4, 5):

$$e_2 = ln\frac{F_2}{F_3} = ln\frac{6782,4}{4154,2} = 0,49,\ e_3 = ln\frac{F_3}{F_4} = ln\frac{4154,2}{1931,9} = 0,77,$$

где e_2 – максимальная интенсивность деформации на втором переходе; e_3 – максимальная интенсивность деформации на третьем переходе; F_3 – минимальная площадь поперечного сечения полуфабриката трубы, полученного после второго перехода высокоскоростного холодного радиального обжатия, мм^2; F_4 –минимальная площадь поперечного сечения полуфабриката трубы, полученного после третьего перехода высокоскоростного холодного радиального обжатия, мм^2.

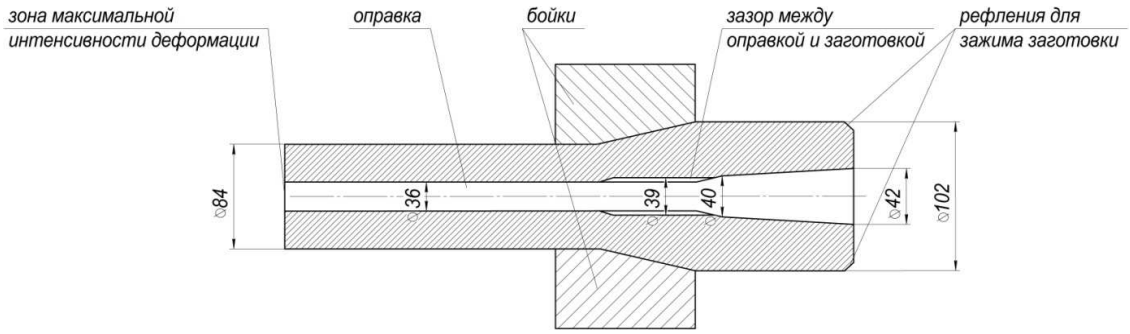


Рис. 4. Второй переход высокоскоростного холодного радиального обжатия

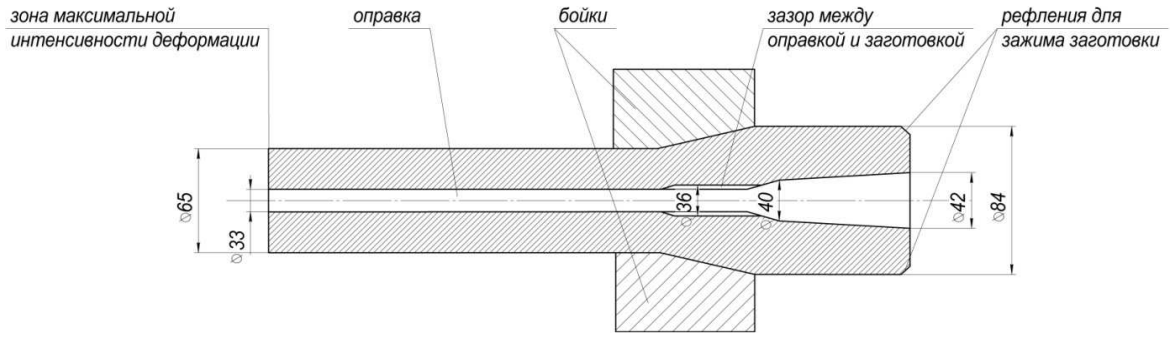


Рис. 5. Третий переход высокоскоростного холодного радиального обжатия

Зона максимальной интенсивности деформации на четвертом переходе высокоскоростного холодного радиального обжатия, реализуемом на дорне, в технологии изготовления трубы представлена на рис. 6. Максимальная интенсивность деформации в этом случае:

$$e_4 = ln\frac{F_5}{F_6} = ln\frac{2461{,}76}{883{,}13} \approx 1,$$

где e_4 – максимальная интенсивность деформации на четвертом переходе; F_5 – максимальная площадь поперечного сечения полуфабриката трубы, полученного после третьего перехода высокоскоростного холодного радиального обжатия, мм^2; F_6 – минимальная площадь поперечного сечения полуфабриката трубы, полученного после четвертого перехода высокоскоростного холодного радиального обжатия, мм^2.

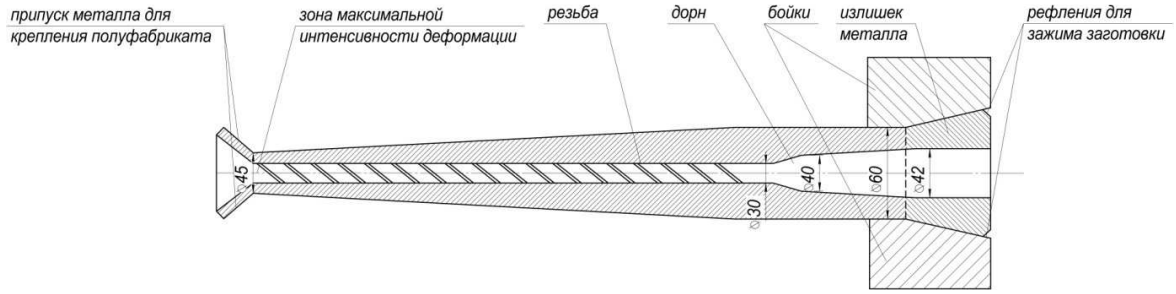


Рис. 6. Четвертый переход высокоскоростного холодного радиального обжатия 4101232,5+2034720-

В соответствии с кривой упрочнения стали 30ХН2МФА, построенной при реализации динамического нагружения и комнатной температуре (рис. 7), определенным значениям интенсивностей деформаций соответствуют следующие значения истинных напряжений: $\sigma_1 = 38{,}5 кг/мм^2$, $\sigma_2 = 38{,}8 кг/мм^2$, $\sigma_3 = 39{,}3 кг/мм^2$, $\sigma_4 = 39{,}8 кг/мм^2$.

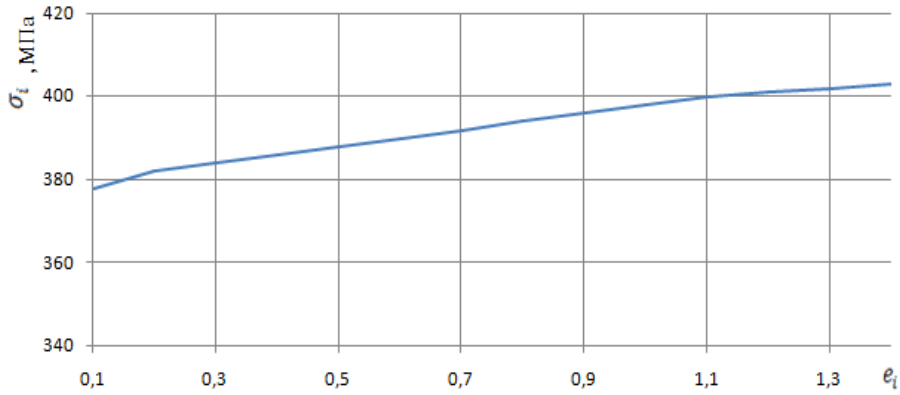


Рис. 7. Кривая упрочнения стали 30ХН2МФА, построенная при Реализации динамического нагружения и комнатной температуре

Определение максимальной удельной силы, действующей на бойки на каждом из переходов, в процессе высокоскоростного холодного радиального обжатия осуществлено по формуле (5)

$$p = \sigma_i\left(1 + \frac{\mu}{1{,}5} \cdot m_{\text{торм}}\right),$$

где μ – коэффициент трения; $m_{\text{торм}} = \frac{F_{\text{трения}}}{F_{\text{истечения}}}$ – коэффициент торможения в завершающей стадии формоизменения; $F_{\text{трения}}$ – площадь трения металла о рабочий инструмент, $мм^2$; $F_{\text{истечения}}$ – площадь истечения металла, $мм^2$.

Максимальная удельная сила, действующая на бойки на каждом из переходов:

$$p_1 = 38{,}5(1+\frac{0{,}2}{1{,}5}\cdot 1{,}49) = 46{,}15 кг/мм^2;\ p_2 = 38{,}8(1+\frac{0{,}2}{1{,}5}\cdot 4{,}7) = 63{,}11 кг/мм^2;$$

$$p_3 = 39{,}3(1+\frac{0{,}2}{1{,}5}\cdot 14{,}3) = 114{,}23 кг/мм^2;\ p_4 = 39{,}8(1+\frac{0{,}2}{1{,}5}\cdot 15{,}5) = 122{,}05 кг/мм^2.$$

Выполненный инженерный расчет силовых характеристик операции высокоскоростного холодного радиального обжатия доказал возможность реализации данной операции в технологии изготовления труб, функционирующих в условиях высоких импульсных термодинамических нагрузок, поскольку рассчитанные значения удельных сил, действующих на бойки, существенно меньше допустимых значений.

Полученные результаты в ходе теоретического исследования силовых характеристик операции высокоскоростного холодного радиального обжатия на оправке (дорне) в технологии изготовления трубы из высоколегированной стали 30ХН2МФА, функционирующей в условиях высоких импульсных термодинамических нагрузок, могут быть использованы в дальнейшем при практической реализации данной операции в технологии изготовления труб.

Список литературы

1. Семенов Е.И. Ковка и штамповка. Горячая объемная штамповка / под общ. ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. Т. 2. 720 с.

2. Лялин В.М., Полтавец Ю.В. Спецтема. Тула. Изд-во ТулГУ. 2013. 330 с.

3. Лялин В.М., Петров В.И., Журавлев Г.М. Основы технологии объемной и листовой полугорячей штамповки. Тула: ТулГУ, 2002. 160 с.

4. Туктанов А.Г. Технология производства стрелково-пушечного и артиллерийского оружия: учебник для студентов вузов. М.: Машиностроение. 2007. 375 с.

5. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. Металлургиздат. 1960. 382 с.

Лялин Виктор Михайлович, д-р техн. наук, профессор, sidom98@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Сидоров Роман Александрович, студент, sidom98@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Зыков Станислав Михайлович, ведущий инженер-исследователь, sidom98@mail.ru, Россия, Тула, АО «КБП»

POWER CHARACTERISTICS STUDY HIGH SPEED COLD RADIAL COMPRESSION PIPE BILLETS FROM STRUCTURAL ALLOY STEEL

V.M. Lyalin, R.A. Sidorov, S.M. Zykov

A study of the power characteristics of the operation of high-speed cold radial compression of a pipe billet on a mandrel was carried out, which substantiates the possibility of implementing the operation in a promising technology for manufacturing pipes from structural alloy steel, operating under high pulsed thermodynamic loads, using the engineering method of calculation.

Key words: semi-hot stamping by extrusion, high-speed radial reduction, structural alloy steel, deformation rate, specific force.

Lyalin Viktor Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor, sidom98@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Sidorov Roman Alexandrovich, student, sidom98@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Zykov Stanislav Michaylovich, leading research engineer, sidom98@mail.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»

УДК 621.454.3

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИНИМУМА МАССЫ СОПЛОВОГО БЛОКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ЗАДАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ

Л.В. Октябрьская

Рассмотрена задача оптимизации плотности материала в конструкции соплового блока. Разработана методика выбора композиционных материалов, обеспечивающих минимальную массу соплового блока при удовлетворении требований к допустимой величине потери удельного импульса тяги.

Ключевые слова: сопловой блок, композиционные материалы, газовый поток, критическое сечение.

С применением высокоэнергетических топлив в современных энергетических установках (ЭУ) снарядов РСЗО практически исключается сохранение исходного профиля проточного тракта сопла даже из тугоплавких металлов и сплавов. Поиск материалов для соплового блока современных ЭУ идет в направлении создания и применения эрозионостойких легких материалов, недефицитных и обеспечивающих требуемые характеристики работоспособности. По мнению зарубежных и отечественных специалистов, наилучшими свойствами по совокупности предъявляемых требований обладают композиты, в частности углеродные. Проведенные исследования по созданию новых композиционных материалов показали, что и углеродные композиты также не обеспечивают сохранение исходного профиля проточного тракта сопла ЭУ, но эффективность их применения наиболее высока среди всех известных типов материалов[1,2].

Надежность соплового блока зависит от совместного влияния несущей способности и эрозионной стойкости конструктивных элементов с учетом реологических свойств материалов. И в данном случае не вызывает сомнений взаимосвязь критерия безотказности соплового блока с основными показателями работоспособности композитов в его конструкции. Сами показатели работоспособности композитов также взаимосвязаны между собой, поскольку их количественные характеристики определяются при совокупном воздействии на конструктивные элементы всех видов действующих нагрузок.

Таким образом, имеет место сложная научно-техническая задача исследования работоспособности композитов в конструкциях сопловых блоков. Решение ее состоит в том, что необходимо для заданных условий эксплуатации ЭУ отыскать оптимальные показатели работоспособности композитов для элементов соплового блока, обеспечивающие требуемые значения критериев эффективности ЭУ. Решение этой научно-технической задачи трансформируется далее в область технологических и материаловедческих исследований, направленных на получение композитов с заранее заданными свойствами.

В качестве показателя работоспособности элемента соплового блока целесообразно принять допустимый унос массы материала, при котором сохраняются в установленных пределах геометрическая форма и размеры элементов при взаимодействии материала с продуктами сгорания топлива (эрозионная стойкость), и допустимый запас несущей способности элемента, при котором гарантируется его целостность как физического твердого тела.

Отличительной способностью композитов как материалов сопловых блоков ЭУ является совмещение в себе функций конструкционных и теплозащитных материалов, которые при взаимодействии с продуктами сгорания топлив подвержены уносу массы в пограничный слой газа [3]. Поскольку основным уровнем исследования качества композитов в конструкциях сопловых блоков является уровень элемента соплового блока, то под термином «работоспособность композита» следует понимать «работоспособность элемента конструкции из композита».

Наиболее практичным показателем работоспособности соплового блока ЭУ является величина разгара рабочей поверхности элементов конструкции, если заведомо обеспечивается их целостность. Т.е. в качестве первого приближения надежность соплового блока ЭУ рассматривается как вероятность того, что в процессе работы конструкции масса элементов не выйдет за пределы установленных норм, регламентирующих сохранение допустимых геометрических форм и размеров, а также целостность элементов.

При решении задачи выбора материалов для элементов проточного тракта сопла ЭУ можно использовать различные методы оптимизационных решений, методы расчета теплообмена, прогрева и уноса массы материалов, методы расчета надежности и выбора характеристик профиля проточного тракта сопла.

Для заданного состава и характеристик продуктов сгорания, параметров работы камеры сгорания и расчетного профиля проточного тракта сопла решается задача отыскания зависимости распределения оптимальной плотности углеродного материала по длине проточного трака сопла, обеспечивающей минимизацию массы элементов соплового блока.

Выбор материалов при этом подчиняется условиям, рассмотренным ниже.

1. Унос массы композита с боковой поверхности в расчетных сечениях не должен превышать требуемую норму разгара: $h_{уср} S_б \rho \le [m] = [u_w \rho \cdot t \cdot S_б]$, где $h_{уср}$- унос массы на сторону в расчетном сечении; $S_б$ – боковая поверхность составной части профиля проточного тракта в окрестности расчетного сечения; ρ – плотность материала в окрестности расчетного сечения; u_w –линейная скорость уноса массы; t – время действия тепловой нагрузки.

Разгар сечения $\Delta\overline{F} = 4\dfrac{h_{уср}}{d_0}\left(1+\dfrac{h_{уср}}{d_0}\right)$, где d_0 – начальный диаметр сечения.

Как было показано выше, дополнительные потери величины удельного импульса ДУ за счет разгара критического сечения при относительной площади $\Delta F_{кр}$<0,1 практически линейно зависят от разгара: $\Delta F_{уд} \approx \Delta F_{кр}$.

2. Удельная энергия разрушения составной части соплового блока в окрестности расчетного сечения не должна превышать предельные несущие возможности материала: $\varphi\sigma\varepsilon \le [E_{уд}]$, φ –коэффициент полноты диаграммы σ- ε; σ , ε – соответственно предел прочности и относительная деформация материала при данной температуре.

3. Надежность каждой составной части соплового блока в окрестности расчетного сечения должна быть не менее заданной. При оценке надежности оценивается составляющая эрозионной стойкости $\Phi\left(\overline{m_y / \sigma_{\overline{m_e}}}\right) \approx \alpha + 3\beta u_w + S_б / m_y = \alpha + \psi\rho \le [P]$, где α, β –коэффициенты линейной аппроксимации интеграла Гаусса в окрестности $[\overline{m_y}]$.

Таким образом, задача расчета зависимости распределения оптимальной плотности углеродного материала по длине проточного тракта сопла может быть сформулирована следующим образом: требуется найти распределение $\bar{\rho}\{\rho_1 ..... \rho_n\}$, при котором масса соплового блока является минимальной из всех возможных вариантов применяемых материалов при удовлетворении требований изменения показателей работоспособности конструкции в установленных пределах. Формализация задачи имеет вид:

- линейный функционал:

$$\rho_{СБ} = \sum_i^n \left(h_{уср} S_б \rho\right)_i = min\,, \tag{1}$$

уравнения связи:

- ограничения по надежности:

$$\sum_i^n \lg\left(\alpha + \psi\rho\right)_i \geq \lg P_{СБ}\,, \tag{2}$$

- ограничение по эрозионной стойкости проточного тракта:

$$\sum_i^n \left(h_{уср} S_б \rho\right)_i \leq \sum_i^n m_y\,, \tag{3}$$

- ограничение по несущей способности конструкции:

$$\sum_i^n \left(\varphi\sigma\varepsilon h_{уср} S_б \rho / m_0\right)_i \leq E_{уд}\,. \tag{4}$$

Система уравнений (1) - (4) относится к классу задач линейного программирования [4]. Недостатком этих методов является громоздкость вычислительного алгоритма, так как решение является итерационным. Кроме того, для решения задачи необходимо располагать результатами расчета прогрева и локального уноса массы материала в расчетных сечениях проточного тракта сопла, термопрочности, надежности. Это делает поиск решения задачи (1) - (4) труднодостижимым.

Поскольку сопловые блоки ЭУ РСЗО имеют относительно небольшие конструктивные размеры, предлагается использовать следующий подход при решении задачи выбора материалов для элементов проточного тракта сопла.

Рассматривается составной сопловой блок, состоящий из следующих элементов: входная часть, зона критического сечения и выходная часть. Для заданного состава и характеристик продуктов сгорания, параметров работы камеры сгорания и расчетного профиля проточного тракта сопла решается задача отыскания оптимальной плотности углеродных материалов для элементов, обеспечивающих минимизацию массы соплового блока. При этом предполагаем, что несущая способность элементов при таком профиле тракта удовлетворяется по критерию удельной потенциальной энергии разрушения $E_{уд} = E_р / W_{СБ}$, где $W_{СБ}$ – объем элементов проточного тракта соплового блока. Удельную энергию деформирования i–го элемента конструкции выразим:

$$E_{удi} = \varphi \frac{\sigma^2}{E_c} \cdot \frac{W}{m} = \varphi \frac{\sigma^2}{E_c} \cdot \frac{h_{ср} S_б}{m} \rho\,, \tag{5}$$

где φ – коэффициент полноты диаграммы деформирования элемента под действием приложенных сил в координатах σ - ε; σ – действующее в элементе напряжение с учетом температуры прогрева; E_c – секущий модуль упругости; m – текущее значение массы элемента $m = m_0 - \int_0^t W_y \rho S_б dt$; $h_{ср}$ – средняя толщина элемента

$$h_{ср} = \left(W_0 - \pi \int_0^l r^2(z) dz\right) \Big/ 2\pi \int_0^l r(z) \left[1 + \left(\frac{dr}{dz}\right)^2\right]^{1/2} dz\,,$$

где W_0 – объем элемента без учета проточной части; l – длина элемента в направлении продольной оси z; $r(z)$ –текущее значение радиуса проточной части сопла.

Также допускаем, что в качестве исходных данных о действующих нагрузках выступают давление газового потока в камере, температура продуктов сгорания в камере, время работы ЭУ, перепад температуры по сечениям элементов. Тепловое состояние элементов соплового блока принимается квазистационарным. В этом случае упрощаются расчеты термических напряжений и относительных деформаций. В качестве ограничений задачи (1) - (4) принимается следующее: удельная потенциальная энергия разрушения каждого элемента принимается величиной постоянной, задаются надежность в форме постоянной величины для всех трех элементов и объем элементов. Для этих условий скорость уноса углеродного композиционного материала выражается через соответствующие определяющие параметры.

Рассматривая сопловой блок, состоящий из трех конструктивных элементов (n=3), можно решение задачи (1) - (4) свести к решению двухмерной задачи линейного программирования. Для этого достаточно ввести обозначения:

$$\rho_1 = x_1, \quad \sum_{i=1}^{i=3}\left(h_{уср} S_б \rho\right)_i = x_2, \quad k = h_{уср} S_б, \quad l = \frac{\varphi}{m_0}\sigma \cdot \varepsilon \cdot k.$$

С учетом введенных обозначений имеем:

$$x_2 = \sum_{i=1}^{i=3}\left(h_{уср} S_б \rho\right)_i = \min; \tag{6}$$

$$\rho_1 = x_1; \tag{7}$$

$$\rho_2 = \frac{E_{уд} - x_1(k_1 + l_1) - (k_3 + l_3)\left(x_2 - k_1 x_1\right)/l_3}{\left(k_3 l_2 - k_3 l_3\right)/k_3}; \tag{8}$$

$$\rho_3 = \left(x_2 - k_1 x_1 - k_2 \rho_2\right)/l_3. \tag{9}$$

Решение двумерной задачи линейного программирования легко достигается с помощью геометрической интерполяции на плоскости (x_1, x_2). Оптимальные значения x_1 иx_2являются координатами вершины многоугольника замкнутой области (x_1, x_2), пересекаемой линейной функцией $\rho_{кСБ} = \sum_{1}^{3}(\xi \cdot \rho_к) = f(x_1, x_2)$ при ее перемещении по области значений (x_1, x_2). При найденных оптимальных значениях x_1 иx_2 получим искомое распределение вектора $\vec{\rho}_к[\rho_{к1}, \rho_{к2}, \rho_{к3}]$:

$$\rho_{к2} = \rho_{к2}(x_1, x_2) \text{ - из формулы} \tag{10}$$

$$\rho_{к3} = \rho_{к3}(x_1, x_2) \text{ - из формулы} \tag{11}$$

$$\rho_{к1} = x_{1опт}.$$

Таким образом, для каждого функционального элемента соплового блока с помощью задачи (6) - (9) можно получить оптимальные значения конструктивной плотности материала. Разработан комплекс математических моделей и на их основе методика выбора композиционных материалов для конкретной конструктивной схемы соплового блока, обеспечивающих минимум массы соплового блока при удовлетворении требований к допустимой величине потери удельного импульса тяги ЭУ.

Список литературы

1. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб.: Науч. основы и технологии, 2008. 10 с.

2. Современные композиционные материалы. Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. Пер. с англ. под ред. И.Л. Светлова. М.: Мир, 1970. 672 с.

3. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 155 с.

4. Лунгу К.Н. Линейное программирование. Руководство к решению задач. М.: Физматлит, 2009. 132 с.

Октябрьская Лариса Владимировна, начальник управления постановки и координации технологических работ, oktyabrskaya.lv@splavtula.ru, Россия, Тула, АО «НПО «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева»

ENSURING OF THE POWER PLANT NOZZLE BLOCK MINIMUM WEIGHT FOR THE COMPONENT PARTS SPECIFIED DESIGN

L.V. Oktyabrskaya

Considered has been the problem of optimization of the material density in the nozzle block structure. Procedure of choice of the composite materials ensuring the nozzle block minimum weight while meeting the requirements to the allowable thrust specific impulse losses has been developed.

Key words: nozzle block, composite materials, gas flow, nozzle throat.

Oktyabrskaya Larisa Vladimirovna, department manager, oktyabrskaya.lv@splav-tula.ru, Russia, Tula, JSC «SPLAV Scientific and Production Association» named after A. Ganichev»

УДК 681.5

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ РЕСТАВРАЦИОННЫХ РАБОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОПРОЧНОГО ГИПСОВОГО МАТЕРИАЛА С ПОЛЫМИ СТЕКЛЯННЫМИ МИКРОСФЕРАМИ

Т.Э. Хаев, Б.А. Айдаров

В данной статье рассмотрены организационно-технологические подходы при организации реставрационных работ. Выявлено отсутствие рекомендаций в нормативно-правовой литературе по проведению реставрационных работ с применением высокопрочного гипсового материала с полыми стеклянными микросферами. Установлена необходимость создания инструмента по комплексной оценке организационных, технических, технологических и управленческих решений, способствующих повышению результативности реализации проекта по реставрации памятников культурного наследия с применением данного материала.

Ключевые слова: организация реставрационных работ, оптимизация строительных процессов, организационно-технологический потенциал, высокопрочный гипсовый материал с полыми стеклянными микросферами.

В настоящее время актуальным направлением в научной области является изучение показателей, влияющих на повышение эффективности организации строительного производства. Систем оценок на сегодняшний день существует очень много. Главным вопросом остается повышение эффективности организации строительства и реставрации. Во-первых, эффективность организации строительства и реставрации можно оценить технико-экономическими показателями, а второе – это сроками проведения

работ. По этому вопросу в настоящее время существует много работ, много научных статей [8,10]. Отдельно стоит упомянуть родоночальника термина «Потенциал организационно-технологических решени» Лапидуса А.А., чьи работы послужили началом нового научного направления, способного единым параметром оценить возможности строительного объекта [7].

Например, доказана эффективность организации производства от уровня кадрового потенциала, участвующих в строительно-монтажных и реставрационных работах [19].

В научных трудах Бидова Т.Х. результативность организации возведения жилых монолитных зданий связано с использованием методов неразрушающего контроля. Установлено, что если правильно организовать такой производственный процесс, как метод неразрушающего контроля прочности монолитных конструкций, то это может повлиять на конечные показатели качества [4 - 6, 8, 13 - 16].

В работах Фатуллаева Р.С. говорится о потенциале капитальных ремонтных работ в многоквартирных жилых зданиях и влиянии на него системы организационно-технологических решений [17-18].

Созданию единой системы организационно-технологических решений при производстве бетонных работ в зимний период уделяется большое внимание. Доказана зависимость выбора методов зимнего бетонирования и возможность регулирования производственных процессов при проведении строительно-монтажных работ в зимний период на сроки возведения типового этажа [10-15].

Внимательно изучив организационно-технологические подходы при организации реставрационных работ памятников культурного наследия, мы сегодня видим отсутствие инструмента, способного, учитывая все факторы, повысить эффективность организации производства.

Известно, что работы с реставрацией памятников культурного наследия выполняются в рамках организационно-технологического проектирования. В этих документах содержится вся последовательность проведения работ, с заранее установленным количеством средств, орудий труда и сроков выполнения работ.

Однако, внимательно изучив нормативную литературу, которая регламентирует порядок разработки организационно-технологической документации, мы сегодня видим отсутствие ярко выраженных рекомендаций и мероприятий, которые, учитывая все возможные ситуации на объекте, могли бы спрогнозировать наилучшее решение по повышению результативности организации реставрационных работ. Ввиду вышесказанного была выдвинута научно-техническая гипотеза: повышение результативности организации реставрационных работ за счет комплексной методики оценки организационных решений - «Потенциала реставрационных работ» с использованием высокопрочного гипсового материала с полыми стеклянными микросферами.

Высокопрочный гипсовый материал с полыми стеклянными микросферами – это облегченный материал, который получился за счет введения в высокопрочный гипс полых стеклянных микросфер, суперпластификатора Peramin SMF-10, гидрофобизатора Vinnapas 8031 H и метакаолина. Доказано, что добавление в гипс всех этих материалов, приводит к улучшению показателей эксплуатационных свойств: прочности при сжатии, изгибе и сцепления с основанием [1-3].

За счет применения методов математической теории эксперимента были решены задачи оптимизации расходов модификаторов (Peramin SMF-10, Vinnapas 8031 H).

После обработки результатов экспериментов были получены уравнения регрессии вида:

$$F(K_1,K_2)= a_0 + a_1 K_1 + a_2 K_2 + a_3 K_1^2 + a_4 K_2^2 + a_5 K_1K_2.$$

При оптимизации составов гипсовых камней с полыми стеклянными микросферами (ПСМС) было реализован двухфакторный вариант математического планирования с опытами в 3-х уровнях.

В качестве варьируемых факторов были выбраны:

K_1 – расход гидрофобизатора Vinnapas 8031 H. Количество выражено в % от массы гипса и варьируется в 3-х уровнях: 2; 4; 6 %.

K_2 – расход суперпластификатора Peramin SMF-10. Количество дано в % от массы гипса и варьируется в 3-х уровнях: 0,5; 0,75; 1 %.

Исследуемые показатели

№	Факторы				Функции цели - свойства		
					Прочность, МПа, на		Влажность, %
	K1	K2	K1	K2	изгиб	сжатие	
1	–1	–1	2	0,5	1,73	3,20	50,2
2	–1	0	2	0,75	2,05	4,25	49,3
3	–1	+1	2	1,0	1,55	2,82	49,5
4	0	–1	4	0,5	2,54	4,81	47,2
5	0	0	4	0,75	2,78	5,11	46,1
6	0	0	4	0,75	2,78	5,17	46,1
7	0	0	4	0,75	2,78	5,17	46,1
8	0	+1	4	1,0	2,04	4,47	47,1
9	+1	–1	6	0,5	1,72	3,12	48,2
10	+1	0	6	0,75	2,04	3,99	48,7
11	+1	+1	6	1	1,54	2,75	47,7

В качестве исследуемых показателей были выбраны:

Z_1 – предел прочности при изгибе, МПа;

Y_2 – предел прочности при сжатии, Мпа; Z_3 – влажность по массе, %.

После обработки результатов, приведенных в таблице, были получены уравнения регрессии для модифицированного гипсового камня с ПСМС:

$$R_{изг} = 2,8 + 1,38\ K_1 + 10,18\ K_2 - 0,17\ K_1^2 - 7,16\ K_2^2$$

(средняя ошибка аппроксимации 2 %);

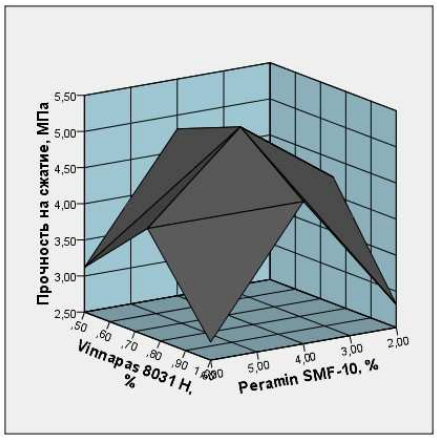
$$R_{сж} = 5,2 + 2,62\ K_1 + 22,83\ K_2 - 0,33\ K_1^2 - 15,72\ K_2^2$$

(средняя ошибка при аппроксимации равна 3 %);

$$w_m = 46 - 6,45\ K_1 + 53,43\ K_2 + 0,76\ K_1^2 - 36,46\ K_2^2$$

(средняя ошибка аппроксимации 3%).

В уравнениях регрессии использованы следующие обозначения: $R_{изг}$ – предел прочности при изгибе, МПа; $R_{сж}$ – предел прочности при сжатии, МПа; w_m – влажность по массе, %.



Поверхность отклика для прочности на сжатие для гипсового камня с ПСМС и СП+Г

Выявлено, что для достижения достаточной прочности необходимо применение суперпластификатора (Peramin SMF-10) – 0,75%, а гидрофобизатора (Vinnapas 8031 H) – 4% от массы высокопрочного гипса.

В результате проведенного эксперимента и подбора необходимого состава пластификатора, удалось добиться высоких результатов по прочности гипсового материала. Данный материал целесообразно использовать при реставрационных работах на объектах культурного наследия, поскольку каркас таких памятников в основном состоит из деревянных материалов, которые, в свою очередь подвержены деформациям.

Данный эффективный гипсовый материал был открыт и внедрен в производство лишь в 2019 году. Необходимым является составление организационно-технических рекомендаций при организации реставрационных работ. Ввиду этого было поставлена цель: формирование модели по комплексной оценке эффективности организационно-технических мероприятий по повышению результативности организации реставрационных работ с применением эффективного гипсового материала.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

выявление факторов, влияющих на повышение эффективности организации реставрационных работ;

проведение квалиметрического анализа;

расчет организационно-технологического потенциала при использовании высокопрочного гипсового материала с полыми стеклянными микросферами при реставрационных работах памятников культурного наследия;

внедрение предложенной организационно-технологической модели.

Список литературы

1. Серова Р.Ф., Хаев Т.Э., Ткач Е.В. Изучение свойств гипсовых систем с полыми стеклянными микросферами для реставрационных работ // Фундаментальные исследования. 2017. № 6. С. 80-85.

2. Хаев Т.Э., Ткач Е.В., Орешкин Д.В. Научно-технические предпосылки разработки облегчённых гипсовых систем с полыми стеклянными микросферами для реставрационных работ // Научное обозрение. 2017. № 7. С. 28- 32.

3. Хаев Т.Э., Ткач Е.В., Орешкин Д.В. Модифицированный облегченный гипсовый материал с полыми стеклянными микросферами для реставрационных работ // Строительные материалы, 2017. № 10. С. 45-51.

4. Бидов Т.Х. Организационно-технологические и управленческие решения использования методов неразрушающего контроля при возведении монолитных конструкций // Научное обозрение, 2017. №13. С. 54-57.

5. Бидов Т.Х., Аветисян Р.Т. Формирование производственно-технологических модулей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 12. С. 496-498.

6. Бидов Т.Х., Аветисян Р.Т. разработка организационно-технологической модели потенциала устройства временного крепления стенок выемок при производстве работ нулевого цикла // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 12. С. 427-431.

7. Лапидус А.А. Потенциал эффективности организационно-технологических решений строительного объекта // Вестник МГСУ. 2014. № 1. С. 175—180.

8. Лапидус А.А., Бидов Т.Х. Формирование производственно-технологических модулей, обосновывающих использование методов неразрушающего контроля при возведении монолитных конструкций гражданских зданий // Наука и бизнес: пути развития. 2019. №1. С. 31-36.

9. Хаев Т.Э., Аветисян Р.Т. Факторы, влияющие на принятие организационно-технологических решений при выборе конструктивных методов креплений стенок выемок и котлованов // Наука и бизнес: пути развития, 2019. С. 85-87.

10. Хубаев А.О. Описание эксперимента при расчете потенциала производства зимнего бетонирования// Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 2. С. 247-252.

11. Хубаев А.О., Бидов Т.Х. Организационно-технологический потенциал использования методов неразрушающего контроля при производстве бетонных работ в зимний период // Наука и бизнес: пути развития, 2018. №4. С. 101-104.

12. Хубаев А.О., Бидов Т.Х. Организационно-технологический потенциал использования методов неразрушающего контроля при производстве бетонных работ в зимний период // Наука и бизнес: пути развития, 2018. С. 101-104.

13. Lapidus A., Bidov T., Khubaev A. The study of the calibration dependences used when testing the concrete strength by nondestructive methods // MATEC Web of Conferences. 2017. V. 117. P. 00094. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201711700094.

14. Lapidus A., Khubaev A., Bidov T. Organizational and technological solutions justifying use of non-destructive methods of control when building monolithic constructions of civil buildings and structures // MATEC Web of Conferences. 2019. V. 251. P. 05014.

15. Lapidus A., Khubaev A., Bidov T. Development of a three-tier system of parameters in the formation of the organizational and technological potential of using non-destructive testing methods // E3S Web of Conferences. 2019. V. 97. P. 06037. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199706037.

16. Lapidus A., Kangezova M., Bidov T. Systematization of organizational and technological aspects of scientific technical support of buildings and constructions over 100m high // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 698. P. 022091.

17. Лапидус А.А., Фатуллаев Р.С. Оценка потенциала проведения внеплановых ремонтных работ многоквартирных жилых домов // Научное обозрение, 2017. С. 10–13.

18. Фатуллаев Р.С., Хаев Т.Э. Использование современных строительных материалов как фактор, влияющий на эффективность организационно-технологических решений при проведении капитального ремонта // Перспективы науки, 2019. №5. С. 224-228.

19. Казакова Н.Е. Повышение квалификации как фактор обеспечения компетентности персонала при строительстве телекоммуникационных объектов и сооружений связи // Вес качества, 2016. №2. С. 112-119.

Хаев Тотраз Эдуардович, канд. техн. наук, доцент, haevt@mail.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,

Айдаров Борис Астанович, технический директор, astanovich2@mail.ru, Россия, Москва, ООО «Бидов Груп»

IMPROVING THE EFFICIENCY OF ORGANIZATION OF RESTORATION WORKS USING HIGH-STRENGTH GYPSUM MATERIAL WITH HOLLOW GLASS MICROSPHERES

T.E. Khaev, B.A. Aydarov

This article discusses the organizational and technological approaches to the organization of restoration work. The absence of recommendations in the normative-legal literature on carrying out restoration work using high-strength gypsum material with hollow glass microspheres was revealed. The necessity of creating a tool for a comprehensive assessment of organizational, technical, technological and managerial solutions that contribute to increasing the effectiveness of the implementation of the project for the restoration of cultural heritage monuments using this material has been established.

Key words: organization of restoration works, optimization of construction processes, organizational and technological potential, high-strength gypsum material with hollow glass microspheres.

Khaev Totraz Eduardovich, candidate of technical sciences, docent, haevt@mail.ru, Russia, Moscow, National research Moscow state University of civil engineering,

Aydarov Boris Astanovich, technical director, astanovich2@mail.ru, Russia, Moscow, LLC Bidov group

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

УДК 681.51

ПОДГОТОВКА КАРТОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КОМПЛЕКСОВ УПРАВЛЯЕМОГО ВООРУЖЕНИЯ

Д.В. Ларин, А.В. Ларин, И.С. Бадосов

Описано применение электронных карт местности в комплексах управляемого вооружения. Проанализировано два вида хранения высотной информации, применяемой в комплексах управляемого вооружения. Рассмотрено использование кэширования географической информации в комплексах управляемого вооружения. Описано разработанное специальное программное обеспечение, реализующее конвертацию кэш данных геопорталов.

Ключевые слова: комплекс управляемого вооружения, электронная карта местности, матрица высот, SRTM, геоинформационная система, геопортал, тайл, тайловая система, кэширование.

Необходимость в оценке местности всегда была существенной для командиров воинских подразделений как на стратегическом, так и на тактическом уровне. Исторически, картографические данные поддерживались в бумажном виде [1]. В настоящее время в комплексах управляемого вооружения (КУВ) широко используются электронные карты местности (ЭКМ).

Электронные карты местности применяются для представления тактической обстановки на фоне карты местности и оценки обстановки с использованием данных электронных карт местности.

Использование электронных карт местности позволяет осуществлять:

планирование боевой задачи;

контроль решения задач топопривязки и ориентирования огневых средств КУВ;

контроль введенных данных о целевой обстановке;

пересчет координат;

получение информации о высоте местности для оценки наличия преград на траектории полета управляемой ракеты и управляемого артиллерийского снаряда.

Для выполнения большинства боевых задач КУВ, необходимо обеспечить наличие высотной информации о рельефе местности в заданном районе работ и оперативную подготовку ЭКМ необходимого района работ.

В качестве высотной информации о рельефе местности используются матрицы высот. Матрица высот имеет регулярную структуру и содержит элементы, значениями

которых являются высоты рельефа местности. Каждый элемент матрицы содержит одно значение высоты. Элемент матрицы соответствует квадратному участку местности, размер стороны которого называется точностью матрицы.

Матрицы высот могут быть построены по семантическим данным объектов векторной карты. Они могут содержать абсолютные высоты рельефа местности или сумму абсолютных и относительных высот объектов.

В специальном программном обеспечении КУВ предлагается использовать два вида высотной информации:

матрицы высот геоинформационных систем (ГИС);

данные SRTM.

В случае отсутствия матриц высот альтернативным источником высотной информации могут служить данные SRTM (shuttle radar topographic mission). Данные SRTM представляют собой результат радарной топографической съемки большей части территории земного шара, за исключением самых северных (>60° с.ш.), самых южных широт (>54° ю.ш.), а также океанов, произведенной в феврале 2000 г. с помощью специальной радарной системы и метода, называемого радарной интерферометрией (radar interferometry). Двумя радиолокационными сенсорами SIR C и X-SAR было собрано более 12 терабайт радиолокационных данных.

Данные SRTM существуют в нескольких версиях: предварительная (версия 1, 2003 г.) и окончательная (версия 2, февраль 2005 г.). Окончательная версия прошла дополнительную обработку: выделение береговых линий и водных объектов, фильтрацию ошибочных значений. Информация о высотах распространяется в нескольких вариантах: сетка с размером ячейки 1x1 угловая секунда и 3x3 угловые секунды.

Данные SRTM с размером ячейки 1x1 угловых секунды (то есть с пространственным разрешением 30 м) являются более точными, но, к сожалению, существуют лишь для территории США. Разрешение данных по высоте 1 метр.

На остальную поверхность Земли общедоступными являются данные SRTM с размером ячейки 3 x 3 угловых секунды (то есть с пространственным разрешением 90 м) и заявленной точностью не ниже 16 м.

Результирующие данные соответствуют спецификации интерферо¬метрических данных о рельефе (Interferometric Terrain Height Data (ITHD) 2). В каждом квадрате 1° широты x 1° долготы (который разбивается на более мелкие квадраты 30 x 30 м) содержится информация о высотах данного элемента земной поверхности (с точностью по высоте не более 20 м), что составляет 3 арксекунды. Такой квадрат является матрицей размером 1201 x 1201 элементов (пикселей). Один дополнительный ряд (нижний) и одна колонка (правая) являются дублирующими и повторяются на соседней матрице.

Данные являются простым 16-битным растром (без заголовка), значение пиксела является высотой над уровнем моря в данной точке, оно также может принимать значение –32768, что соответствует значению no data (нет данных). Референц-эллипсоид данных – WGS-84.

Стоит учитывать, что матрица SRTM имеет ошибку, которая в среднем составляет для равнинной территории 2,9 м и 5,4 м – для холмистой местности. В горах перепады высот могут достигать даже 100 м и больше.

Значительная часть этих данных включает систематическую ошибку. Указанная в спецификации SRTM точность 16 м наиболее близко соответствует критерию LE-90 [3].

Матрица SRTM по своим точностям примерно соответствует матрице, полученной с карты масштаба 1:100 000. При учете систематической ошибки, вероятно, возможно повышение точности матрицы SRTM.

Помимо обеспечения КУВ высотными данными, не менее важным является оперативная подготовка ЭКМ территории района работ.

Данные ЭКМ в КУВ могут поставляться в виде векторных карт –ограниченных участков территории земного шара, хранящих в себе геометрические характеристики объектов на земной поверхности. В случае, если нет возможности иметь векторные карты заданного района работ, то возможным решением является использование геопорталов в КУВ. Данные геопорталов представлены в виде карт космических снимков и их комбинаций.

Геопортал – веб-портал, отображающий и предоставляющий доступ к географической информации посредством веб-сервисов. На данный момент времени, большинство популярных ГИС серверов, к примеру, такие как Google Maps, OpenStreetsMaps, Яндекс Карты, Космоснимки имеют возможность предоставлять топографическую информацию в виде растровых изображений, нарезанных на небольшие плитки – тайлы (tile). В качестве тайлов в основном используются квадраты размером 256 x 256 пикселей. Плитки формируют изображение всей территории в нескольких фиксируемых масштабах. Тайлы на одном масштабе образуют уровень (Z). Чем выше уровень – тем больше на нем плиток и, соответственно, больше хранящейся информации. Совокупность всех плиток и их уровней называется тайловая система (Tile System), основой которой является географическая проекция. Наиболее популярной географической проекций является проекция Меркатора, с помощью которой строится вся тайловая система на весь земной шар. Она используется такими сервисами, как Космоснимки, Яндекс Карты, Google Maps, Роскосмос, OpenStreetMap. При увеличении масштаба земного шара количество плиток увеличивается по формуле:

$$N = H \times V, \quad (1)$$

$$H = V = 2^z, \quad (2)$$

где N – количество тайлов на уровне; H – количество плиток по высоте; V – количество плиток по ширине; Z – номер уровня, начиная с нуля; Например, для уровня $Z = 2$ при полном покрытии земного шара потребуется шестнадцать тайлов. На рис. 1 представлен пример построения тайловой системы в проекции Меркатора.

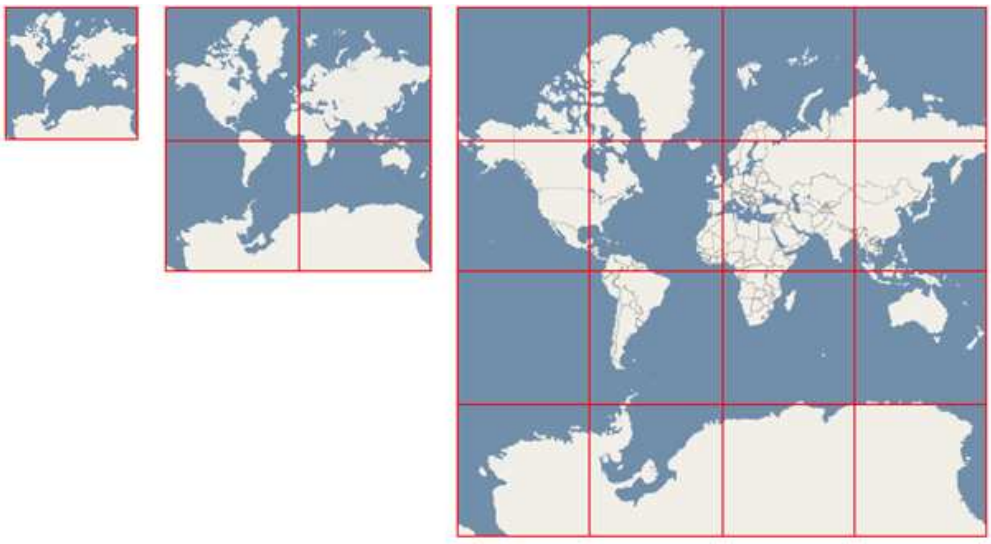


Рис. 1. Тайловая система в проекции Меркатора

При эксплуатации КУВ не всегда есть доступ к географической информации посредством веб-сервисов по причине отсутствия доступа к интернету, поэтому целесообразно использовать кэширование геоинформационных данных.

При кэшировании картографического сервиса сервер отображает карту на нескольких заданных пользователем уровнях масштабирования и сохраняет эти изображения. Когда сервер получает запрос на карту, он возвращает одно из этих кэшированных изображений для отображения карты.

Предлагаемый метод хранения кэшированных тайлов основан на модели XYZ, используемый в ГИС «Панорама». Для данной модели в запросе в явном виде должны присутствовать значения положения по горизонтали (X), вертикали (Y), уровню (Z). Модель позволяет описать запросы ко многим сервисам, среди которых Google, Яндекс, и др. Дерево тайлов хранится на сервере в виде файлов с расширением .jpg или .png, в зависимости от используемого формата в сервисах ГИС. Файлы укомплектованы по папкам. Шаблон расположения тайлов может выглядеть следующим образом:

<путь к расположению кэша>\Cache\z[Z]\x[X]\y[Y].jpg

Таким образом, для плитки Z= 9, X = 162, Y = 93 путь к расположению файла будет выглядеть:

<путь к расположению кэша>\Cache\z9\x162\y93.jpg

Если кэш содержит достаточное количество данных для выполнения задач, пользователь имеет возможность работать с ними в режиме off-line, не тратя время и ресурсы на подключение к сети. При хранении данных в кэше необходимо контролировать объемы памяти информационного носителя. К примеру, при полном покрытии земного шара тайловой системой до уровня $Z = 16$, при среднем размере одного тайла в 15 Кб, требуемая память к информационному носителю составит более 60 Тб. Хранение таких объемов информации в пределах одного комплекса не является оптимальным решением.

Следовательно, систему кэширования возможно реализовать по четырем параметрам:

кеширование выбранного района работ;

кэширование во время выполнения текущих запросов;

кэширование дополнительных областей вокруг зон повышенного интереса;

постепенное кэширование зон интересов по требованию пользователя, учитывая пространства выделенной памяти информационного носителя;

постепенное освобождение памяти при отсутствии интереса пользователя к определенным зонам области земного шара.

Для оперативного обеспечения КУВ электронными картами местности из доступных источников (геопорталов Google, Yandex и др.) разработано специальное программное обеспечение, реализующее конвертацию кэш данных геопорталов. За источник доступа к картографической информации взята геоинформационная система «SAS.Планета» по причине автоматизированного процесса выгрузки заданного района в кэш. Модель тайловой системы формата SAS.Планеты выглядит следующим образом:

<Корневая папка>\z[Z+1]\[X/1024]\x[X]\[Y/1024]\[Y].<EXT>

Таким образом, для плитки Z= 14, X = 9907, Y = 5258 путь к расположению файла будет выглядеть:

<путь к расположению кэша>\cache\map\z15\9\x9907\5\y5258.png

После выполнения автоматизированной конвертации кэш-данных модель тайловой системы формата ГИС «Панорама» выглядит следующим образом:

<путь к расположению кэша>\Cache\z14\x9907\y5258.jpg

Реализованный функционал конвертора кэш данных геопорталов обеспечивает:

выбор каталога с кэш-данными формата «SAS.Планета»;

выбор каталога, куда будут помещаться кэш-данные в формате ГИС «Панорама»;

конвертацию кэш-данных SAS Planet в формат кэш-данных «Панорама», включающую преобразование структуры хранения тайлов, изменение названий файлов и каталогов с тайлами;

индикацию процесса конвертации и результат.

Разработанное программное обеспечение конвертации кэш-данных геопорталов позволяет автоматизировать процесс подготовки электронных карт местности.

Таким образом, при подготовке для КУВ картографических данных предложено:

для обеспечения высотной информацией о рельефе местности наряду с матрицами высот использовать данные SRTM;

в случае отсутствия или неактуальности векторных ЭКМ использовать растровые данные геопорталов, сохраненные в виде кэш.

Список литературы

1. Миронова Ю.Н. Геоинформационные системы // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. №3-1. [Электронный ресурс] URL: https://cyberleninka.ru/article/n/geoinformatsionnye-sistemy-1 (дата обращения: 07.10.2020).

2. Беленков В.В., Корж М.М. Основные направления применения геоинформационных технологий в военном деле // Информационные технологии и компьютерная инженерия. [Электронный ресурс] URL: https://gisinfo.ru/item/41.htm (дата обращения: 06.10.2020).

3. Дубинин М. Описание и получение данных SRTM // GIS-Lab. [Электронный ресурс] URL: https://gis-lab.info/qa/srtm.html (дата обращения: 08.10.2020).

Ларин Дмитрий Викторович, заместитель начальника отделения, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»,

Ларин Андрей Викторович, начальник отдела, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»,

Бадосов Иван Сергеевич, инженер, kbkedr@tula.net, Россия, Тула, АО «КБП»

APPLICATION OF GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS IN GUIDED WEAPON SYSTEMS

D.V. Larin, A.V. Larin, I.S. Badosov

The use of electronic maps of the area in guided weapon systems is described. Two types of storage of altitude information used in guided weapon systems are analyzed. The use of caching of geographic information in guided weapon systems has been substantiated. The developed special software is described that implements the conversion of the cache of geoportals data.

Key words: guided weapon system, electronic terrain map, DEM, SRTM, geographic information system, geoportal, tile, tile system, caching.

Larin Dmitriy Victorovych, deputy head of department, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Larin Andrey Victorovych, head of section, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Badosov Ivan Sergeevych, engineer, kbkedr@tula.net, Russia, Tula, JSC «KBP»

УДК 621.375

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ТКАНИ

Н.С. Тархов, Р.П. Лазуткин, А.Н. Тархов

Рассмотрено моделирование теплового поля щитовидной железы человека с опухолью различного диаметра, расположенной на заданной глубине.

Ключевые слова: биологическая ткань, моделирование, пространственно-геометрическая модель, тепловое поле.

Температура является одним из важнейших маркеров патологических изменений в организме человека. Измеряя интенсивность теплового излучения в микроволновом диапазоне, можно неинвазивно выявлять тепловые аномалии на глубине 2-10 см [1]. Изменение температуры биологических тканей могут быть связаны с процессами канцерогенеза (ангиогенеза, повышением метаболизма злокачественных клеток и активизации васкуляризации), воспалительных процессов, сосудистой патологии, травм и др. На сегодняшний день РТМ-диагностика получила широкое распространение в различных областях медицины (онкология, неврология, гинекология, урология, травматология, флебология и др.), успешно применяется при диагностике/выявлении онкологических заболеваниях молочной железы [2].

Области применения радиотермометрии (РТМ) представлены на рис. 1.

Модель является представлением объекта, системы или понятия (идеи) в некоторой форме, отличной от формы их реального существования. Модель какого-либо объекта может быть или точной копией этого объекта (хотя и выполненной из другого материала и в другом масштабе), или отображением некоторых характерных свойств объекта в абстрактной форме [3].

В случае биологических тканей, групп тканей, органов или биологических объектов в целом невозможно их точное воспроизведение в виде модели из-за сложной пространственной организации, а также протекающих в них процессов. Поэтому требуется существенное упрощение конфигурации исследуемой области с сохранением наиболее важных параметров. При этом для внесения упрощений и допущений в модель биологического объекта требуются некоторые знания из тех областей, в которых будут проводиться эти самые упрощения и допущения.

Таким образом, моделирование биологических тканей, групп тканей или органов требует некоторых знаний из области топографической анатомии: расположение органа, тканевый состав как органа, так и вокруг него, размеры и соотношения органов и тканей. Данная информация необходима для грамотного внесения упрощений и допущений в модель. Также необходимо определить все факторы, влияющие на температуру моделируемой области.

В качестве объекта исследования биологической ткани выбрана злокачественная опухоль в щитовидной железе и прилегающие к ней органы. Щитовидная железа расположена в подъязычной области переднего отдела шеи. Она состоит из двух боковых долей и перешейка, лежащего на первых кольцах трахеи. Подробное топографическое описание органа и характеристики опухолевых новообразований представлено в [4, 5].

Исследуемая область биообъекта содержит следующие типы ткани: покровные ткани (кожа), мышечная ткань (мышцы шеи, подкожная мышца), соединительная ткань (фасции, трахея, оболочки органов), жировая ткань (подкожная клетчатка), костная ткань (шейные позвонки). Щитовидная железа, а также ее опухоль содержат эпителиальные клетки и клетки соединительной ткани. Теплофизические свойства моделируемых биологических тканей и электрофизические параметры (глубина измерений – 2 - 5 см, диапазон измерений – 1 - 4 ГГц) взяты из [6, 7].

Для моделирования в пакете программ COMSOL Multiphysics версии 5.5 необходимо не только знание параметров материалов, из которых состоит исследуемый объект, но и пространственное представление этого объекта, его геометрическая модель.



Рис. 1. Области применения радиотермометрии

При составлении пространственно-геометрической модели исследуемой области, включающей в себя щитовидную железу, трахею, шею, пищевод необходимо применение некоторых допущений и упрощений пространственной организации области. Толщина фасций (соединительной ткани, образующей оболочки внутренних органов, нервов, мышц) достаточно мала по сравнению с толщиной мышечного слоя, заключенного между соседними фасциями. Поэтому при составлении модели их можно не учитывать, считая мышечный слой сплошным. Щитовидный хрящ гортани можно не выделять, учитывая, что по сравнению с остальными тканями исследуемой области его вклад в тепловое поле будет минимален.

Сонную артерию и внутреннюю яремную вену целесообразно рассматривать в качестве единого целого в случае, когда кровоток не будет рассматриваться как движение вязкой жидкости.

Соотношение костной ткани и тканей межпозвоночных дисков таково, что межпозвоночные диски можно не включать в пространственно-геометрическую модель исследуемой области.

Введенные упрощения и допущения позволяют представить пространственно-геометрическую модель области шеи, включающей в себя щитовидную железу, как набор относительно простых геометрических поверхностей, ограничивающих пространство, занимаемое определенными органами и тканями.

Таким образом, опираясь на информацию о строении исследуемой области, можно задать следующие пространственные представления:

внешняя граница: цилиндр 120 мм в диаметре и высотой 100 мм;

первый слой: кожа толщиной 2 мм;

второй слой: жировая клетчатка толщиной 2 мм;

третий слой: подкожные мышцы толщиной 2 мм;

четвертый слой: жировая клетчатка 2 мм;

щитовидная железа: 2 эллипсоида с размерами полуосей 7,5 мм, 12 мм, 25 мм;

перемычка щитовидной железы: параллелепипед высотой 15 мм, шириной 22 мм и глубиной 4 мм;

трахея: полый цилиндр диаметром 18 мм, толщина стенки 2 мм;

пищевод: полый цилиндр диаметром 20 мм, толщина стенки 3 мм;

позвоночник: цилиндр диаметром 50 мм, высота 100 мм;

сосуды: цилиндр 20 мм;

все остальное пространство занимает мышечная ткань.

Упрощенное пространственно-геометрическое представление исследуемой области имеет следующий вид, представленный на рис. 2 и 3.

Щитовидная железа является симметричным органом, поэтому для наблюдения асимметрии температурных изменений в тканях опухоль будем располагать только у поверхности одной из боковых долей органа. Успешное численное моделирование тепловых параметров объекта во многом будет зависеть от заданных граничных условий. Таковыми для данной модели будут являться: температура окружающей среды, т.е. воздуха в помещении, температура внешних покровов моделируемого (исследуемого) объекта, температура артериальной крови, температура внутренних тканей.

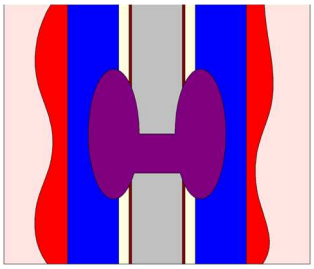


Рис. 2. Пространственная модель. Вид спереди



а ***б***

Рис. 3. Пространственная модель биологических тканей:
а – поперечный разрез; б – продольный разрез

Цвета на схемах и тип биологической ткани связаны следующим образом:

– мышечная ткань;
– ткань пищевода (мышечная);
– костная ткань;
– кожные покровы;
– жировая ткань;
– ткани сонной артерии;
– щитовидная железа;
– трахея (соединительная ткань);
– воздух.

Пространственно-геометрическая модель исследуемой области биологических тканей (рис. 4) состоит из так называемых доменов. В соответствие со структурой области каждому домену был назначен материал с характеристиками биологических тка-

ней. Основная часть модели была размещена в области домена, которому был назначен материл - воздух. На границах данного домена была установлена граничное условие температуры воздуха: 21 градус Цельсия.

На внешних границах доменов, соответствующих слою кожи, была установлена граничное условие температуры 33 градуса Цельсия.

Температура доменов, соответствующих крупным кровеносным сосудам, 37 градусов Цельсия.

Для заданных опухолей диаметром 2, 5 и 10 мм были созданы отдельные копии моделей при различной глубине расположения опухоли. И, соответственно, был проведен ряд независимых друг от друга моделирований теплового поля для каждого из вариантов.

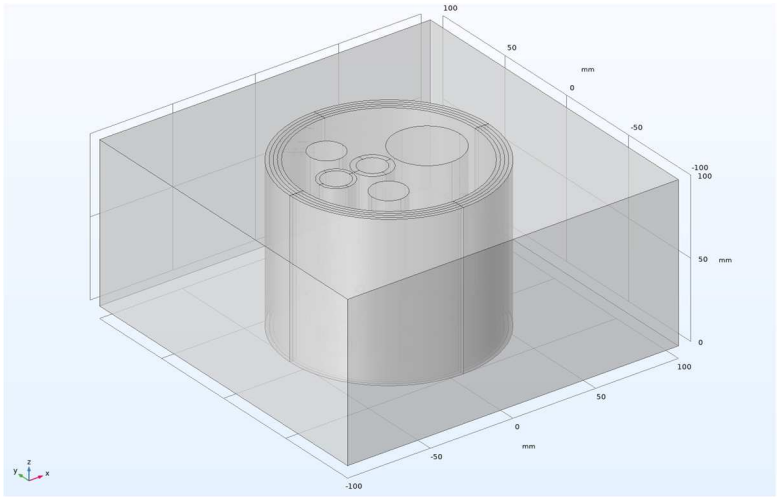


Рис. 4. Вид модели биологической ткани в объеме

Результат моделирования теплового поля биологической ткани в объеме соответствует изображению на рис. 5.

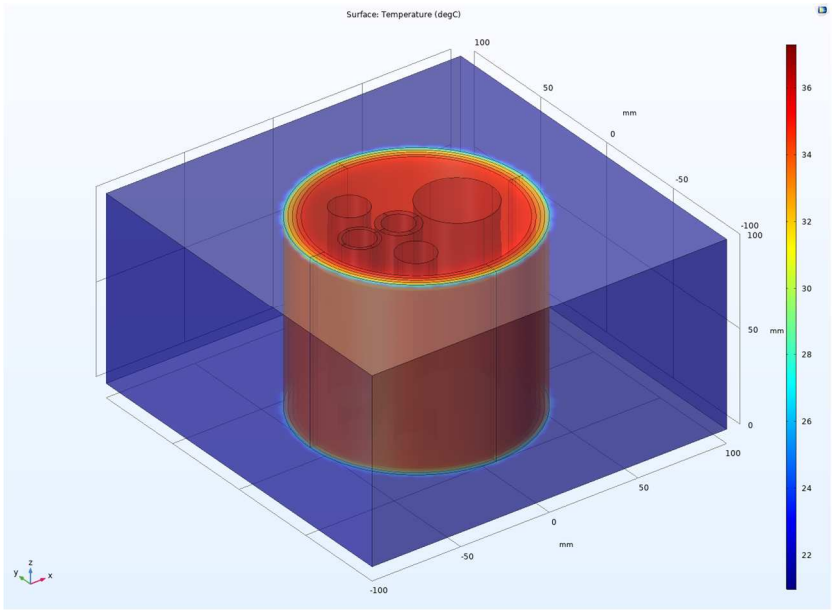


Рис. 5. Вид теплового поля биологической ткани в объеме

Как видно из рис. 5, такое представление не дает исчерпывающей информации о распределении тепла. Поэтому в модель было введено несколько секущих плоскостей, проходящих через репрезентативные точки модели:

плоскость, проходящая поперек модели через опухоль и щитовидную железу;

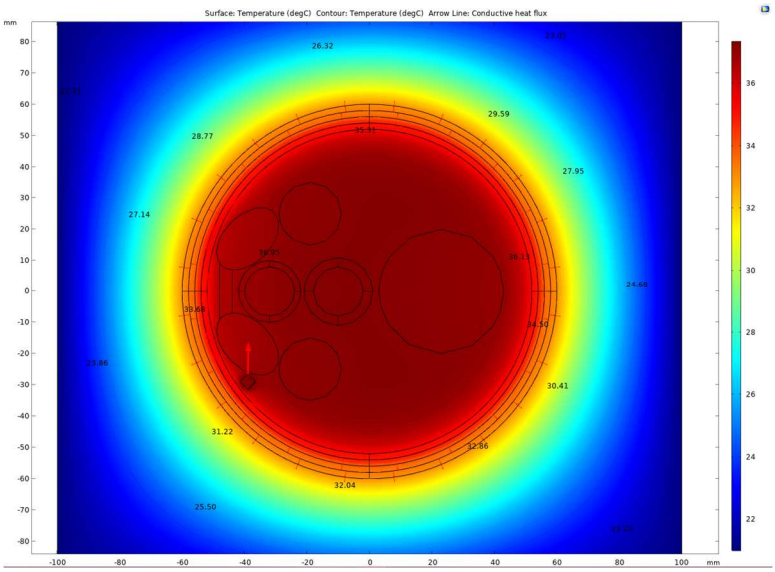
плоскость, проходящая вдоль модели через опухоль и щитовидную железу;

плоскость, проходящая вдоль модели через опухоль, но только на стороне одной из боковых долей щитовидной железы;

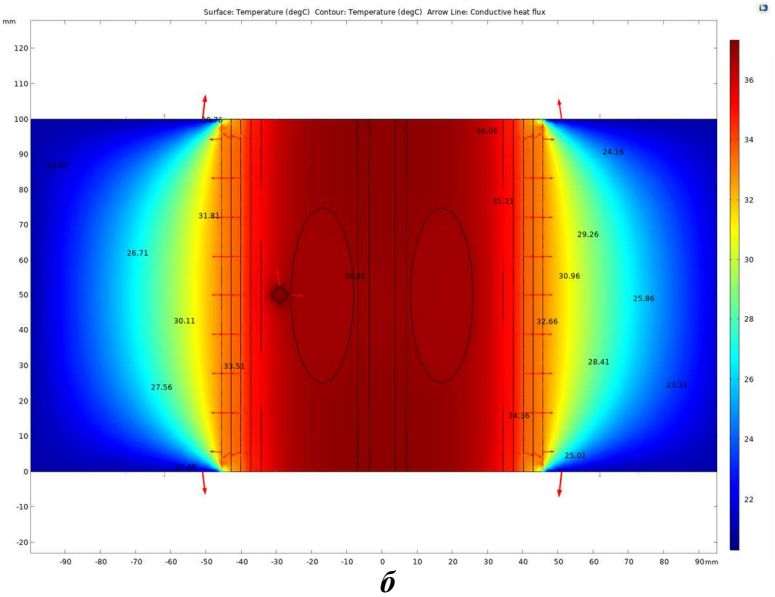
плоскость, проходящая вдоль модели параллельно боковой доле щитовидной железы без опухоли.

Такой подход дал всесторонне рассмотреть распределение тепла в области, пораженной опухолью, а также рассмотреть асимметрию температур парного органа.

Моделирование проводилось для опухолей диаметров 2, 5 и 10 мм. На рис. 6 и 7 представлены тепловые поля пространственно-геометрических моделей исследуемой области для диаметра опухоли 5 мм.



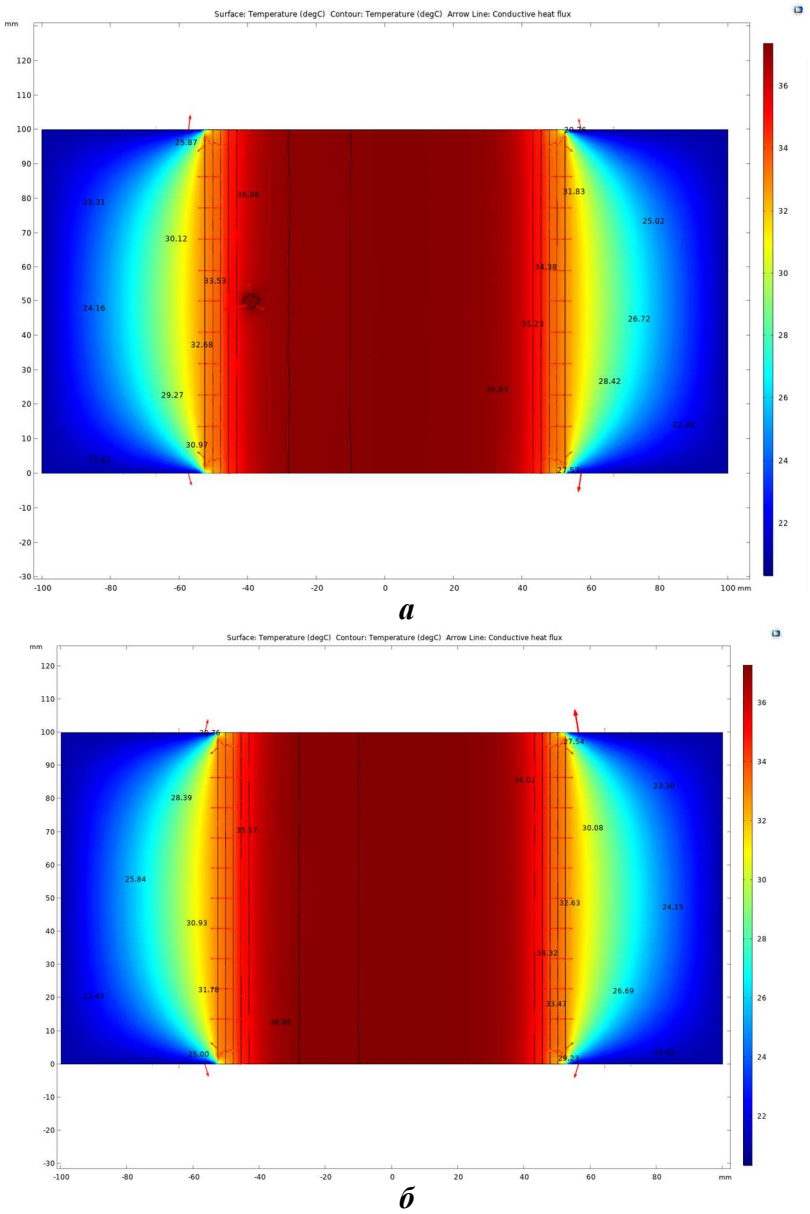
а



б

Рис. 6. Тепловое поле опухоли диаметром 5 мм: а – поперечный разрез; б – продольный разрез

Для составления графиков глубинных температур ткани инструментами программы COMSOL Multiphysics были получены значения температур центра опухолевого новообразования при различных глубинах его расположения, а также для аналогично расположенных симметричных точек близ парного органа (рис. 8).



а

б

Рис. 7. Тепловое поле опухоли диаметром 5 мм. Асимметрия температур: а – сторона с опухолью; б – сторона без опухоли

Согласно полученным данным, в зависимости от размера опухоли разница температур между симметричными участками органа с опухолью и без нее составляет от 0,4 градуса Цельсия до 1 градуса Цельсия. Однако при увеличении глубины расположения опухоли разница температур уменьшается в 2 - 3 раза (0,2 – 0,5 градуса Цельсия).

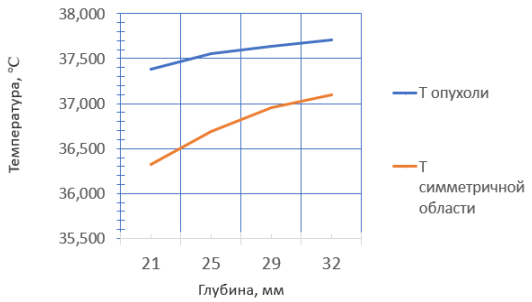


Рис. 8. График глубинных температур для опухоли диаметром 5 мм

Таким образом, проработка адекватных математических моделей тканевых структур биологических объектов необходима для разработки новых аппаратов, экспертных систем, систем поддержки для РТМ-диагностики, а также для совершенствования существующих аппаратов и систем.

Список литературы

1. Веснин С.Г., Седанкин М.К. Математическое моделирование собственного излучения тканей человека в микроволновом диапазоне // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. №9. С. 33-44.

2. Седанкин М.К., Веснин С.Г. Потенциальные возможности радиотермометрии как медицинского метода // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. №12. С. 163-166.

3. Никаноров Б.А., Индюхин А.Ф. Математическое моделирование биотехнических систем: учебное пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. 115 с.

4. Оперативная хирургия и топографическая анатомия / под ред. В.В. Кованова. 2-ое изд. перераб. и доп. М.: Медицина, 1985. 368 с.

5. Струков А.И., Серов В.В. Патологическая анатомия: учебник; под ред. В.С. Паукова. 6-е изд., перераб. и доп. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2015. 880 с.

6. Биофизические характеристики тканей человека: справочник / Березовский В.А., Колотилов Н.Н.; Отв. Ред. и авт. предисл. Костюк П.Г. Киев: Наук. Думка, 1990. 224 с.

7. Лосев А.Г., Хоперсоков А.В. [и др.] Проблемы измерения и моделирования тепловых и радиационных полей в биотканях: анализ данных микроволновой термометрии // Вестник ВолГУ. Серия 1: математика и физика. 2015. №6 (31). С.31-71.

Тархов Николай Сергеевич, канд. техн. наук, профессор, t-ni@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Лазуткин Роман Петрович, магистр, romkafaust@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Тархов Андрей Николаевич, магистрант, tarhovi42009@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MODELING THE THERMAL FIELD OF BIOLOGICAL TISSUE

N.S. Tarkhov, R.P. Lazutkin, A.N. Tarkhov

Modeling of the heat field of the thyroid gland of a person with a tumor of various diameters located at a given depth is considered.

Key words: biological tissue, modeling, spatial-geometric model, thermal field.

Tarkhov Nikolay Sergeevich, candidate of technical science, professor, t-ni@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Lazutkin Roman Petrovich, magister, romkafaust@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Tarkhov Andrei Nikolaevich, undergraute, tarhovi42009@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 378.016

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ СОВРЕМЕННОГО УЧЕБНОГО ЗАНЯТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСТАНЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Е.Н. Патрикова, Т.С. Патрикова

Представлен анализ методических основ организации современного учебного занятия с использованием дистанционных образовательных технологий и электронного обучения.

Ключевые слова: дистанционные образовательные технологии, электронное обучения, сервисы, телекоммуникационные технологии.

Современные исследователи предлагают рассматривать дистанционное обучение как самостоятельную форму организации образовательного процесса. Вместе с тем в условиях, в которых российская система образования оказалась в период перехода в режим быстрого реагирования, связанный с новой короновирусной инфекцией, преподавателям пришлось существенно пересмотреть свой подход к организации дистанционного обучения студентов. В связи с чем, представляется актуальной необходимость анализа методических основ проведения учебных занятий с использованием цифровых технологий и различных форм дистанционного обучения.

До недавнего времени во многих методических источниках существовала подмена понятий. Такие термины как «дистанционное обучение», «электронное обучение», «открытое образование» и т. п. практически не различались. С экстренным переходом на, так называемый, дистант стало ясно, что электронное обучение – это удаленное обучение с использованием различных телекоммуникационных технологий, при котором взаимодействие преподавателя и студента происходит асинхронно, то есть каждый из них осуществляет доступ к размещенным в цифровой образовательной среде материалам неодновременно. Дистанционное обучение, напротив, носит синхронный характер, когда и преподаватель, и студент в одно и тоже время находятся в едином цифровой образовательном пространстве. На первый взгляд складывается впечатление, что дистанционное обучение ничем принципиальным не отличается от традиционной очной формы, с той лишь разницей, что преподаватель и студенты находятся не в одной аудитории, а работают удаленно друг от друга. Но практика периода самоизоляции показала, что перенос в неизменном виде дидактических и иных материалов курса, разработанного для очной формы обучения, в дистанционную среду – не эффективен. У этого есть несколько причин:

ограничения, которые накладывает дистанционная образовательная среда;

низкий уровень самоорганизации студентов;

низкий уровень владения цифровыми технологиями у преподавателей, имеющих ученую степень.

Таким образом, прежде чем приступать к проектированию учебных занятий с использованием дистанционных образовательных технологий и электронного обучения, необходимо тщательно спланировать образовательный процесс с учетом той электронной образовательной среды [1], которую использует конкретный вуз или колледж.

Важным методическим инструментом по доставке образовательного контента в условиях самоизоляции становится педагогический дизайн – это новый инструмент в арсенале преподавателей, с помощью которого мы можем проектировать эффективные онлайн-курсы. При проектировании дистанционных занятий необходимо учесть множество факторов. Элементы учебного занятия, реализуемого с использованием дистанционных образовательных технологий и электронного обучения приведены в таблице.

Важно понимать, что виды контроля сильно зависят от численности студентов, которые проходят тот или иной курс. Если преподаватель единовременно работает с потоком от 500 и более студентов, рекомендуется максимально унифицировать контрольно-измерительные материалы и автоматизировать процесс проверки и оценивания с помощью автоматизированных информационных систем.

Если курс изучают одна-две группы студентов можно предложить контрольные задания, которые студенты будут размещать на онлайн-платформе, а преподаватель будет «вручную» осуществлять их проверку и выставление оценок.

Элементы учебного занятия, реализуемого с использованием дистанционных образовательных технологий и электронного обучения (начало)

№	Элемент	Краткая характеристика		
1	Форма взаимодействия со студентами	**Синхронно**	**Асинхронно**	**Смешанно**
		Предполагает взаимодействие преподавателя и студентов в режиме реального времени с использованием онлайн-сервисов для видеоконференций, например, Zoom, Skype, GoogleMeet, MicrosoftTeems и т.д.	Предполагает размещение преподавателем различных материалов в онлайн-среде. Студенты изучают материалы в удобное для себя время и выполняют контрольные задания, который потом проверяет и оценивает преподаватель	Признана наиболее эффективной формой обучения в условиях самоизоляции. Предполагает, что в соответствии с расписанием обучающиеся встречаются с преподавателем на видео-конференции, после чего изучают материалы и выполняют задания в онлайн-среде
2	Темп освоение материала	Время на освоение материала задается преподавателем и ограничено длительностью видеоконференции, что не позволяет в полной мере подстроить темп под каждого студента	Преподаватель может ограничить период доступа к материалам курса, но свой темп работы с предложенными материалами студент контролирует сам	Преподаватель и студент совместно регулируют темп основания материала, что позволяет в большей степени дифференцировать подход к обучению
3	Форма представления информации	Лекционная с использованием элементов фасилитации, например, блиц-опросов или различных сервисов для создания интерактивных упражнений. Например, короткий вебквест на 3-6 вопросов блиц-опроса можно создать с помощью отечественного ресурса learnis.ru; или создать кроссворд с теми же 3-6 понятиями с помощью сервиса learning.apps, короткую онлайн-викторину с элементами геймификации можно составить с помощью Kahoot или Quiziz и т. п.	Ключевые элементы контента полностью асинхронного занятия: 1. Инструкция в видео (видеоролик продолжительностью не более 10 минут) или аудио (подкаст на 7-15 минут) формате 2. Лонгрид (англ. longread; long read — букв.» долгое чтение») – это формат подачи текстового материала, при котором текст разбивается на максимально лаконичные фрагменты с помощью различных мультимедийных элементов (интерактивных схем, двигающихся картиной, инфографики, пиктограмм и т. п.)	1. Лекция с элементами фасилитации 2. Видео или аудио инструкция к изучению асинхронной части курса 3. Лонгрид занятия
4	Типы заданий	Студенты слушают и отвечают на вопросы	Студент читает и решает задачи, загружая решенные задачи в онлайн-среду для «ручной» проверки преподавателем	Студенты могут осуществлять активное экспериментирование через различные онлайн-симуляторы и тренажеры и взаимодействовать между собой

Элементы учебного занятия, реализуемого с использованием дистанционных образовательных технологий и электронного обучения (окончание)

№	Элемент	Синхронно	Асинхронно	Смешанно
5	Обратная связь	Со стороны преподавателя	Как со стороны преподавателя, так и автоматизированная	Со стороны преподавателя, автоматизированная и от других обучающихся
6	Контроль и оценка	Актуализация знаний студентов по прошлой теме, определение их степени готовности к изучению нового материала, закрепление знаний по изученной теме лекции	Диагностика достигнутых результатов обучения. Даже если большую часть курса студенты прослушали в формате видеоконференций, для итогового контроля по теме или разделу рекомендуется использоваться асинхронные средства, например, можно предложить им заполнить Google Форму или выполнить онлайн-тестирование в среде Moodle	Рекомендуется использовать накопительную систему оценивания, учитывать результаты взаимооценки обучающихся, и адресно работать с отстающими

Еще один вызов, с которым столкнулась система образования в условиях пандемии – это отсутствие у студентов стационарных компьютеров и необходимостью адаптировать материалы курсов для обучения с использованием мобильных средств связи. Большинство сервисов для организации видеоконференций уже имеют мобильные приложения, а для доставки контента в асинхронном формате можно использовать облачные технологии. Например, сервисы Google или Яндекс. Осуществляя совместный доступ студентов к документам, размещенным в облачных хранилищах, предоставляя им возможность единовременно редактировать и комментировать данные документы, можно даже проводить проектно-исследовательскую деятельность.

Успех дистанционного обучения в условиях самоизоляции напрямую зависит от мотивации студентов. Как отмечают ведущие вузы страны, несмотря на все усилия преподавательского состава и самих студентов культура онлайн-обучения только начинает формироваться. И как у любого новшества у дистанционного обучения есть и будут свои плюсу и минусы. Поэтому обмен опытом между преподавателями по проектированию и реализации учебных занятий с использованием различных цифровых средств и технологий – ключевой ресурс повышения эффективности дистанционного обучения.

В связи с этим каждому преподавателю, вынужденному адаптировать материалы своих занятий к дистанционной форме, можно предложить ответить на следующие вопросы:

1. В какой форме будет проходить занятие (синхронно, асинхронно, смешанно)?

2. Могу ли я делегировать своим студентам право самим регулировать темп изучения материала (да, нет, частично)?

3. В какой форме мне представить информационные материалы занятия с учетом его дидактических целей (видео, аудио, текст, онлайн-тренажер и т. п.)?

4. Какие типы заданий позволят студентам не только закрепить новые знания, но и сформировать умения и навыки?

5. Какие формы обратной связи будут приемлемы для меня и эффективны для студентов?

6. Кто и как будет оценивать выполненные задания (преподаватель, автоматизированная система, сами студенты)?

Уже сейчас ясно одно: будущее уже наступило, дистанционная форма обучения стала для нас данностью и диктует свои правила как преподавателям, так и студентам. Следовательно, чем эффективнее мы научимся совмещать ее с традиционными для нас форматами взаимодействия и формирования знаний, умений и компетенций, тем успешнее будут наши выпускники в долгосрочной перспективе.

Список литературы

1. Патрикова Е.Н., Патрикова Т.С. Современные технологии обучения и цифровые ресурсы в проектной деятельности студентов-оружейников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 11. С. 477-481.

Патрикова Елена Николаевна, канд. техн. наук, доцент, elenapatrikova@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Патрикова Татьяна Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, valeropatrik@yandex.ru, Россия, Тула, Институт повышения квалификации и профессиональной переподготовки работников образования тульской области

FEATURES OF THE ORGANIZATION OF MODERN TRAINING SESSIONS USING DISTANCE LEARNINGEDUCATIONAL TECHNOLOGY

E.N. Patrikova, T.S. Patrikova

The article presents an analysis of the methodological foundations of the organization of modern training sessions using distance learning technologies and e-learning.

Key words: distance learning technologies, e-learning, services, telecommunications technologies.

Patrikova Elena Nikolaevna, candidate of technical science, docent, elenapatrikova@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Patrikova Tatyana Sergeevna, candidate of technical science, docent, head of the department, valeropatrik@yandex.ru, Russia, Tula, Institute of improvement of professional skill and professional retraining of educators in the Tula region

УДК 004.78:62-83

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ УЧЕБНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС «СКАЛА»

В.Ю. Островлянчик, В.А. Кубарев, О.А. Игнатенко, М.М. Кучик, О.Р. Галлямова

В статье рассмотрен программно-аппаратный автоматизированный учебно-производственный комплекс «СКАЛА», его структура и возможности использования в образовании и производстве. Приведено описание компонентов комплекса, показаны направления дальнейшего развития с учётом современных требований и изменения номенклатуры средств автоматизации.

Ключевые слова: система кафедра-лаборатория, СКАЛА, электропривод, информационная система, обучение.

В настоящее время предприятиям энергетики, металлургической и горнодобывающей промышленности требуются подготовленные кадры в области проектирования и обслуживания электроприводов, а также автоматизированных систем управления производством (АСУ П). АСУ П создаются на основе отдельных узлов автоматизации основных технологических процессов (локальных АСУ ТП), включающих силовое электрооборудование и электроприводы различных мощностей от единиц до десятков тысяч киловатт. В подобной АСУ ТП отдельная система электропривода представляет собой локальную автоматическую систему управления (АСУ ЭП), входящую как подсистема в АСУ ТП.

Таким образом, современный специалист в области электропривода и промышленной электроники, должен быть подготовлен и уметь не только проводить наладку систем управления электроприводом, но и работать с элементами АСУ ЭП включая настройку электроприводов и программирование технологических контроллеров [1, 2], что требует работы обучающихся непосредственно с электроприводом и вовлечения их в эксперименты на «живом» электроприводе.

Для повышения эффективности подготовки специалистов был разработан автоматизированный учебно-производственный комплекс «Система кафедра-лаборатория (СКАЛА)». Комплекс обеспечивает подключение рабочих мест, обучающихся под контролем преподавателя и научных сотрудников к физическим моделям электроприводов, расположенных в машинном зале, через локальную вычислительную сеть университета и передачу оперативной информации о проводимом эксперименте на рабочие станции. Надо отметить, что подобные идеи высказывались ранее и реализация, и внедрение в учебный процесс отдельных элементов подобных комплексов в том или ином виде положительно сказывалось на качестве обучения [3, 4, 5].

На рис. 1 представлена диаграмма вариантов использования комплекса СКАЛА, показывающая основные взаимодействия пользователей системы.

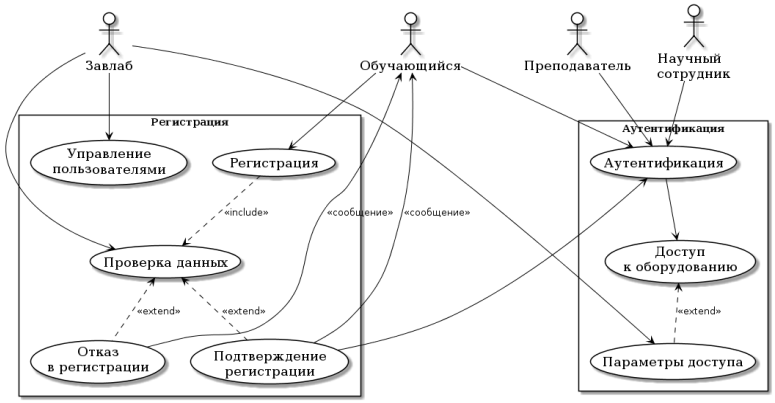


Рис. 1. Диаграмма вариантов использования системы СКАЛА

Рабочие места учебно-производственного комплекса находятся в разных корпусах университета. Места обучающихся и преподавателя расположены на кафедре, а рабочие места заведующего лабораторией и научных сотрудников расположены в лаборатории автоматизированного электропривода технологических процессов (ЛАЭП ТП) рядом с машинным залом, содержащим системы управления и электроприводы, представляющие собой модели электроприводов разных типов: тиристорный преобразователь – (генератор) – двигатель (ТП-(Г)-Д), частотный преобразователь – асинхронный двигатель (ЧП-АД), частотный преобразователь – синхронный двигатель (ЧП-СД).

В состав физической модели электропривода входит: система управления — контроллер технической автоматики и защит (КТАЗ) для электропривода постоянного тока или система автоматического управления и защит (САУЗ) в физических моделях с асинхронным и синхронным приводом, цифровая система автоматического управления электроприводом (ЦСУ) и система управления тиристорным преобразователем нагрузочного двигателя (ТП НД).

Системы управления в машинном зале связаны по протоколу Modbus, применяемый интерфейс RS-485, связь с верхним уровнем осуществляется через преобразователь интерфейса RS-485 / Ethernet.

Рабочие места обучающихся оснащены стендами на основе контроллеров Fastwel CPC10703 и CPC109, а также Advantech ADAM-5510 и программным обеспечением для работы с регистрирующе-диагностическим устройством, на серверах лаборатории и учебного класса устанавливаются СУБД СКАЛА и её версия СУБД КЛАСС соответственно.

На рис. 2 представлен внешний вид стенда на базе контроллера Fastwel CPC10703.

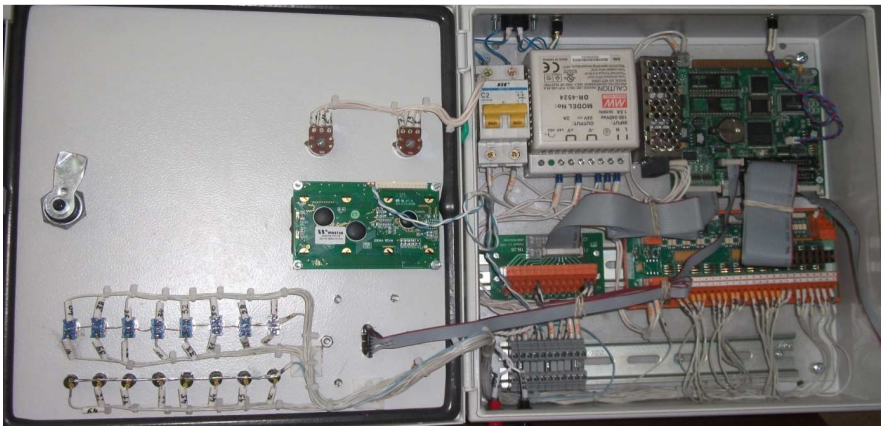


Рис. 2. Контроллер на рабочем месте обучающегося на базе Fastwel CPC10703

Представленный лабораторный стенд включает в себя: контроллер Fastwel CPC10703, источники питания Meanwell +5В и +24В, матричную клавиатуру FP-3, клеммную плату с опторазвязкой на 16 входов и 8 выходов TBI-16/8 C, набор переключателей для задания состояний дискретных входов, и потенциометры для задания аналоговых сигналов местного управления.

На рис. 3 представлена диаграмма развёртывания системы СКАЛА с узлами системы и компонентами программного обеспечения, размещёнными на каждом узле.

Во время работы системы при снятии характеристик с выбранной физической модели данные поступают на регистрирующе-диагностическое устройство и сохраняются в базе данных РДУ, с АРМ оператора на пульте управления сохраняются в БД АРМ, откуда они собираются сервером в БД СКАЛА для дальнейшего использования.

Для применения в системе СКАЛА разработано программное обеспечение для моделирования электроприводов горно-металлургического комплекса. В структуру программного обеспечения входит база данных параметров технологического процес-

са, электрооборудования и электрических машин, модуль анализа и моделирования и модуль работы с пользователем, предназначенный для формирования отчётов и вывода результатов моделирования как на экран, так и в виде различных отчётов.

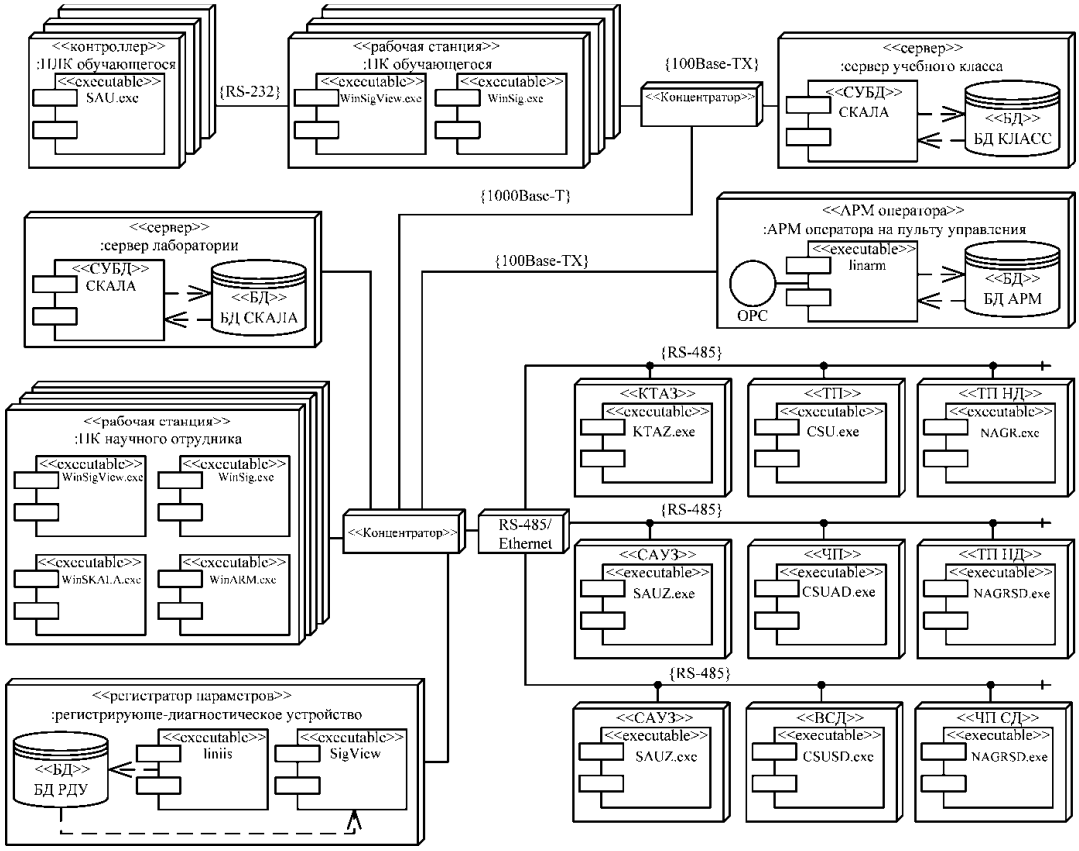


Рис. 3. Диаграмма развёртывания системы СКАЛА

Причём доступ к РДУ и АРМ оператора на пульте управления обеспечивается как через специальное ПО, так и при необходимости прямого управления экспериментом посредством удалённого рабочего стола с существующих рабочих мест.

Структура программного обеспечения комплекса СКАЛА представлена на рис. 4.

При разработке комплекса программ особое внимание уделялось его направленности на работу с пользователями, в том числе с обучающимися, которые только осваивают работу с научными системами и программирование. Программное обеспечение комплекса разрабатывалось по модульному типу с применением технологии автоматного программирования [6, 7], что позволило упростить отладку и ввод системы в работу. Алгоритм работы комплекса СКАЛА показан на рис. 5.

Таким образом, в настоящее время в комплекс СКАЛА входят три физические модели электроприводов, регистрирующе-диагностическое устройство, АРМ оператора, серверы баз данных и восемь рабочих мест, оснащённых контроллерами Fastwel и Advantech что, позволяет изучать и программировать системы управления электроприводами различных типов.

При разработке автоматизированного учебно-производственного комплекса «СКАЛА» создана инфраструктура и программное обеспечение, которое позволило кроме выполнения учебных задач и повышения качества учебных курсов по дисциплинам «Системы управления электроприводов», «Промышленные контроллеры» и «Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов», также создать полигон для испытания и разработки промышленных образцов систем управления [8, 9], перед поставкой их заказчику.

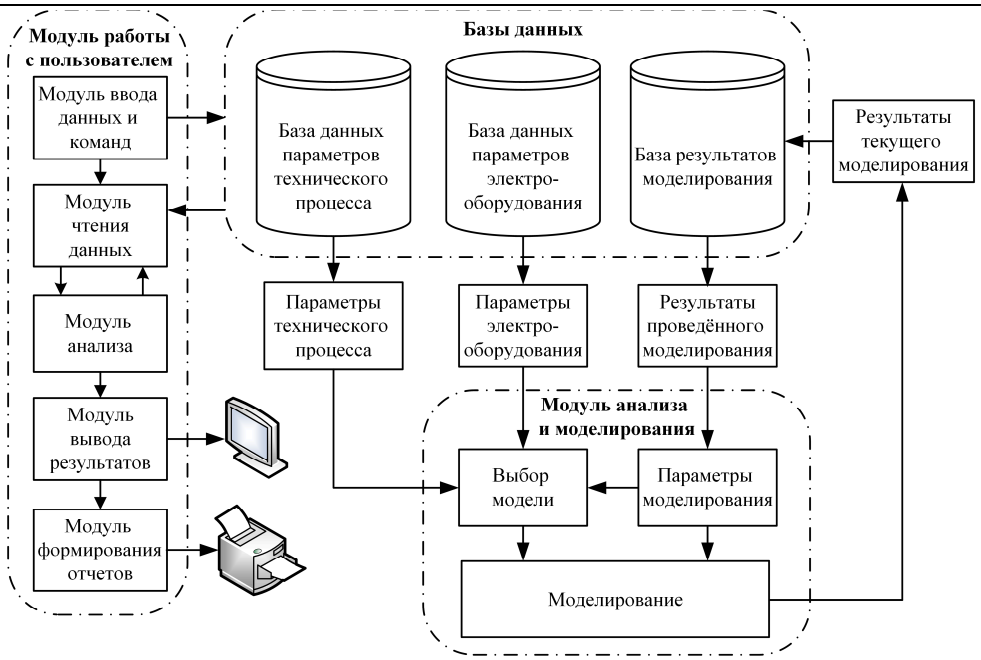


Рис. 4. Структура программного обеспечения комплекса СКАЛА

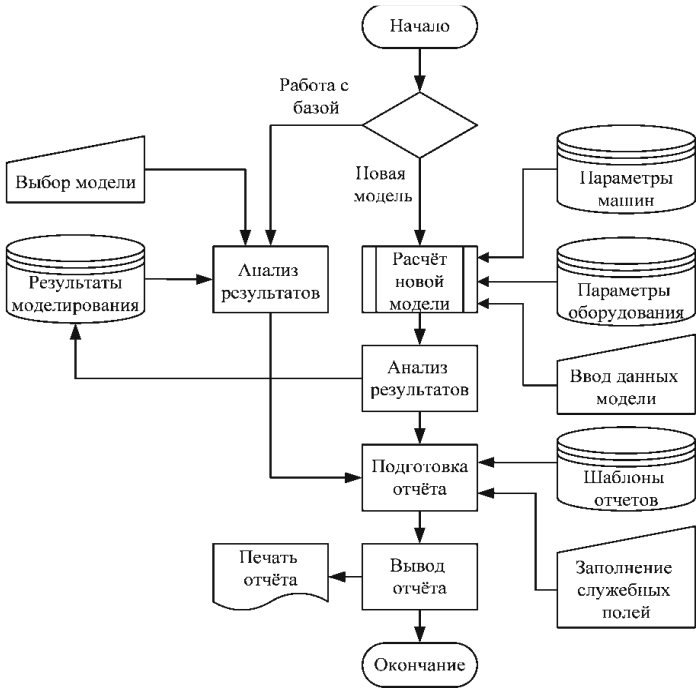


Рис. 5. Алгоритм работы системы

В дальнейшем планируется модернизации комплекса путём ввода в него контроллеров фирм Siemens и Schneider Electric, как наиболее часто применяемых в настоящее время на промышленных предприятиях Кузбасса, а также интеграция комплекса СКАЛА в систему дистанционного обучения Moodle, что позволит проводить отдельные эксперименты обучающимся, находясь вне вуза.

Список литературы

1. Островлянчик В. Ю. Автоматический электропривод постоянного тока горно-металлургического производства: учебное пособие. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2004. 383 с.

2. Авраменко В.Ф., Островлянчик В.Ю., Кубарев В.А. Проблемы развития автоматизированного электропривода шахтных подъёмных установок // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: Труды Третьей Всероссийской научно-практической конференции. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2006. С. 3 – 7.

3. Афонин Ю., Шарнин Л., Баран Е., Липницкий А., Лысов Н., Маслов А., Федоряк Р. Микропроцессорная техника для вузов // Современные технологии автоматизации. 2001, № 3. С. 58 – 67.

4. Баран Е., Захаров П., Любенко А. Web-лаборатория «Микроконтроллеры и сигнальные процессоры» // Современные технологии автоматизации. 2005 №1. С. 64 – 68.

5. Островлянчик В.Ю., Галлямова О.Р. Учебно-производственный комплекс СКАЛА // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: Труды Третьей Всероссийской научно-практической конференции. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2004. С. 181 – 185.

6. Шалыто А.А. SWITCH–технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. СПб.: Наука. 628 с.

7. Harel, David. Statecharts: A Visual Formalism for Complex Systems // Sci. Comput. Programming (8), 1987. P. 231 – 274.

8. Островлянчик В.Ю., Кубарев В.А., Корнеев В.А., Галлямова О.Р. Реализация на основе ПЛИС системы технологической автоматики и защит подъёмной установки с электроприводом переменного тока // Вестник КузГТУ. 2017. №5. С. 127-136.

9. Островлянчик В.Ю., Кубарев В.А., Модзелевский Д.Е., Борщинский М.Ю., Веригин Н.В., Маршев Д.А., Ермаков И.А. Унифицированная цифровая система управления вентиляторной установкой // Вестник КузГТУ. 2018. №1. С. 139-148.

Островлянчик Виктор Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, kafaep@sibsiu.ru, Россия, Новокузнецк, Сибирский государственный индустриальный университет,

Кубарев Василий Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, kubarev.sibsiu@list.ru, Россия, Новокузнецк, Сибирский государственный индустриальный университет,

Игнатенко Оксана Александровна, старший преподаватель, oksana.nkz@mail.ru, Россия, Новокузнецк, Сибирский государственный индустриальный университет,

Кучик Марина Михайловна, аспирант, ведущий инженер, officium_meum@list.ru, Россия, Новокузнецк, Сибирский государственный индустриальный университет,

Галлямова Ольга Радиковна, соискатель, 20gao15@mail.ru, Россия, Новокузнецк, Сибирский государственный индустриальный университет

AUTOMATED EDUCATIONAL AND PRODUCTION COMPLEX «SKALA»

V.Yu. Ostrovlyanchik, V.A. Kubarev, O. A. Ignatenko, M. M. Kuchik, O. R. Gallyamova

The software and hardware automated educational and production complex «SKALA», its structure and possibilities of use in education and production are considered. A description of the complex components is given, directions for further development are shown, taking into account modern requirements and changes in the range of automation equipment.

Key words: department-laboratory system, SKALA, electric drive, information system, education.

Ostrovlyanchik Victor Yuryevich, doctor of technical science, professor, kafaep@sibsiu.ru, Russia, Novokuznetsk, Siberian State Industrial University,

Kubarev Vasiliy Anatolevich, candidate of technical science, docent, head of department, kubarev.sibsiu@list.ru, Russia, Novokuznetsk, Siberian State Industrial University,

Ignatenko Oksana Alexandrovna, senior lecturer, oksana.nkz@mail.ru, Russia, Novokuznetsk, Siberian State Industrial University,

Kuchik Marina Michaylovna, postgraduate, lead engineer, officium_meum@list.ru, Russia, Novokuznetsk, Siberian State Industrial University,

Gallyamova Olga Radikovna, applicant, 20gao15@mail.ru, Russia, Novokuznetsk, Siberian State Industrial University

УДК 623.4.01

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХОДОВОЙ ЧАСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ В SIEMENSIMAGINE.LABLMS

И.Д. Шадрин, Д.В. Юдинцев

В статье рассматривается комплексная методика процесса построения численной модели ходовой части военной гусеничной машины для её всестороннего анализа. В основе лежит структурная модель, которая представляется в виде блок-схемы и используется на всех этапах проектирования изделия. Предложенная в статье методика подразумевает создание в кратчайшие сроки единой параметризованной математической модели, которая используется на всех этапах проектирования изделия. Требуемая детализация модели зависит от этапа выполнения опытно-конструкторской работы и требуемого расчёта.

Ключевые слова: военная гусеничная техника, параметризованная математическая модель, методика создания математической модели.

В настоящее время, тенденции в разработке и модернизации систем для основных боевых танков, идут по пути усложнения [1]. Это связано с тем, что системы и агрегаты становятся более интегрированными, взаимозависимыми и взаимовлияющими друг на друга. Несмотря на это, время, выделяемое для разработки нового изделия, либо модернизации устаревшего, постоянно уменьшается. Как следствие, объём работы у инженера-конструктора увеличивается и усложняется, при неизменных требованиях, предъявляемых к точности и качеству проектируемого изделия.

Поэтому, для расчёта и моделирования военных гусеничных машин требуется программное обеспечение, с максимально широким и гибким функционалом, которое могло бы объединить в одной модели несколько разделов физики. Именно таким ПО и представляется *Siemensimagine.LABLMS*.

Siemensimagine.LABLMS – это программный пакет представляющий из себя набор инструментов, используемых для моделирования, анализа и прогнозирования производительности в многодисциплинарных системах.

Из основных свойств данного ПО стоит отметить:

1. Сочетание одномерного и трёхмерного моделирования, что позволяет построить параметризованную функциональную модель;

2. Возможность связать между собой различные области физики, такие как гидравлика, пневматика, механика, электрика, термодинамика и электромеханика;

3. Возможность анализа работы и оптимизации параметров изделия;

4. Поведение физических систем описывается с помощью нелинейных нестационарных аналитических уравнений.

Процесс моделирования состоит из создания эскиза системы, назначения подмоделей компонентов, задания параметров и режима симуляции.

Для создания методики исследования, был рассмотрен ГОСТ РВ 15.203-2001 [2]. Основываясь на нём, был сделан, вывод, что на каждом из этапов разработки будет требоваться разная проработанность создаваемого изделия, следовательно, требуются разные по назначению и сложности модели.

Для создания математической модели была разработана следующая методика, состоящая из трёх основных этапов (табл. 1).

Таблица 1

Методика создания математической модели

Этап разработки	Выполняемая проработка
Концептуальная проработка изделия	В данном блоке определяется архитектура изделия с точки зрения входящих в неё базовых систем; строится структурная модель, которая отражает основу изделия, состав входящих систем и информацию об их интеграции и связи между ними. Состав структурной модели и связи между элементами определяется из предшествующего опыта проектирования, или тактико-технического задания. После создания основы, производится построение первичной обобщённой функциональной модели (расчётные компьютерные модели систем и подсистем). Функциональные модели изначально являются полностью параметризованными, поэтому имеется автоматическая возможность изменить характеристики работы системы в модели за счёт простого изменения величины (или функции) того или иного параметра.
Разработка систем изделия	На данном шаге производится требуемая детализация, в зависимости от этапа выполнения опытно-конструкторской работы. Под детализацией на этом этапе понимается построение более детальных расчётных моделей, в которых должна быть определена вся архитектура системы, включая все входящие в неё подсистемы и агрегаты.
Уточнение модели	Завершающий этап разработки математической модели. Производится верификация изделия по результатам физического эксперимента.

Как результат, основываясь на статье [3], выбранной методике создания математической модели, и при поддержке АО «Уральское конструкторское бюро транспортного машиностроения» была воссоздана укрупнённая математическая модель изделия (рис. 1).

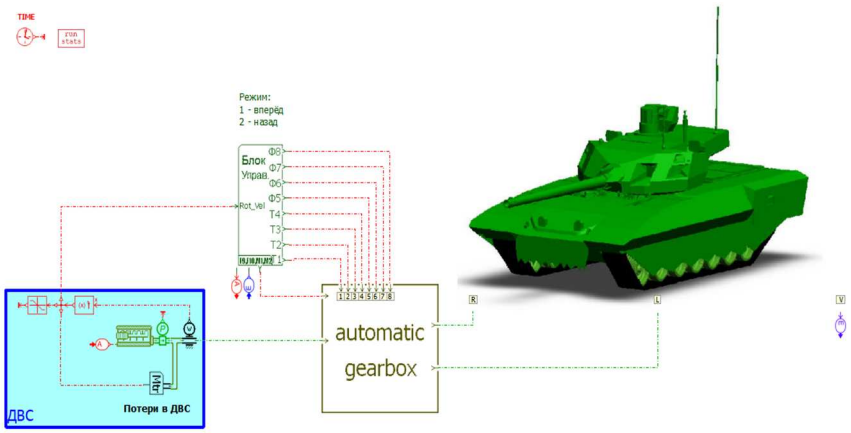


Рис. 1. Укрупнённая математическая модель изделия

Данная модель состоит из следующих элементов: высокофорсированного дизельного двигателя (блок ДВС); блока управления (Блок. Управ.); трансмиссии; автоматической коробки передач (automaticgearbox)и ходовой части. Между элементами (системами) этой структурной модели заданы основные связи (например, между двигателем и трансмиссией – момент и обороты). Каждый элемент математически описан, произведена параметризация.

Для проверки правильности построения математической модели, было проведено имитационное моделирование движения военной гусеничной машины. Выбрано прямолинейное движение изделия, с принятыми начальными параметрами:

1. Ходовая часть представлена в виде колёсной базы автомобиля, имитирующей массово-инерционные характеристики военной гусеничной машины.
2. Троганье происходит с места, со второй передачи, через 10 секунд после запуска симуляции.
3. Время, затрачиваемое на переключение передачи, составляет 3 секунды.
4. Изделие движется в течение 100 секунд.
5. Учтён коэффициент сопротивления качению, потери в механизмах управления.
6. Воздействие внешней среды на изделие не учитывается.

После симуляции, был построен график зависимости скорости движения от времени (рис. 2).

Анализируя разгон изделия, плавность хода и моменты в трансмиссии был сделан вывод, что все процессы протекают относительно верно в сравнении с реальным прототипом изделия. Таким образом, можно сделать вывод, что функциональная математическая модель изделия была построена – верно.

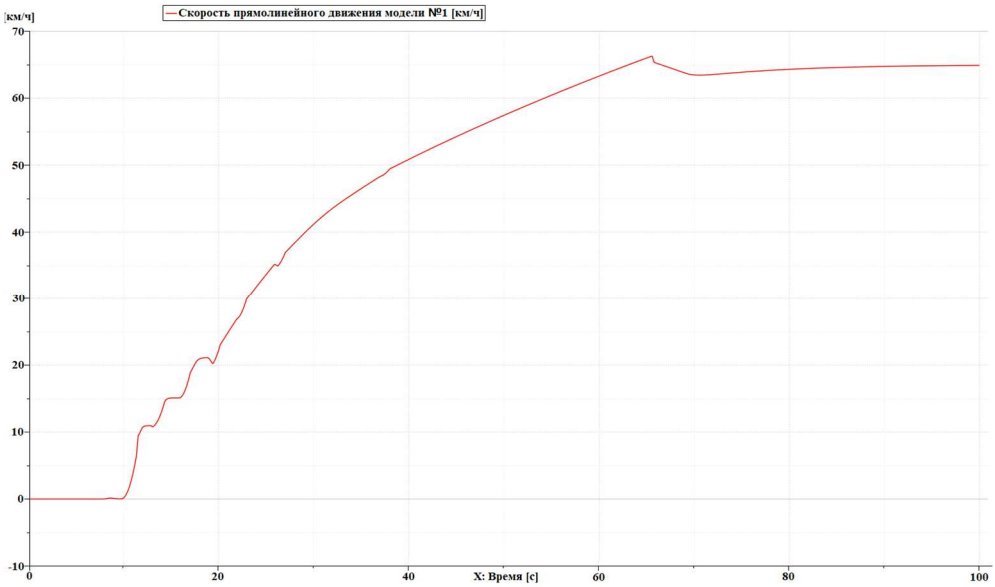


Рис. 2. График скорости прямолинейного движения модели

Для дальнейших разработок, связанных с модернизацией и проведением научно-исследовательских работ, связанных с изделием, было принято решение по дополнительному уточнению существующей математической модели изделия. С этой целью был выделен ряд основных компонентов, нуждающихся в детализации и уточнении параметров их работы. Одним из них является ходовая часть изделия.

Как было указанно ранее, ходовая часть была представлена в виде колёсной базы автомобиля. Недостатками данного способа представления ходовой части является: объединение опорного катка с ведущим колесом; невозможность учёта характеристик каждого отдельно взятого элемента ходовой части; для расчёта используются усреднённые значения массово-инерционных и геометрических параметров.

Существующий компонент колёсной базы автомобиля, был заменён на многоосную модель бронетранспортёра, что позволило избавиться от большинства недостатков колёсной базы, описанных раннее, при этом были учтены геометрические и инерционно-массовые параметры ходовой части реального изделия. Также, за счёт использования многоосной модели, появляется возможность выделить одну ось на ведущее колесо, одну на опорный каток, а оставшиеся две привести к характеристикам подвески относительно центра тяжести изделия.

Стоит отметить, что на данном этапе моделирования, гусеничный движитель учитывается в виде потерь на нём, но при этом сама гусеница не строится. Её введение в существующую модель требует построения дополнительного 3D-компонента, что не целесообразно, на данном этапе проектирования, и требует большого опыта в проработке такого рода компонентов.

Для верификации доработок было проведено дополнительное имитационное моделирование прямолинейного движения модели. Начальные параметры сохранились такими же, как и при первой симуляции.

После тестовой симуляции была произведена линеаризация полученных результатов. Таким образом, были построены сравнительные графики скорости прямолинейного движения (рис. 3) и ускорения модели (рис. 4).

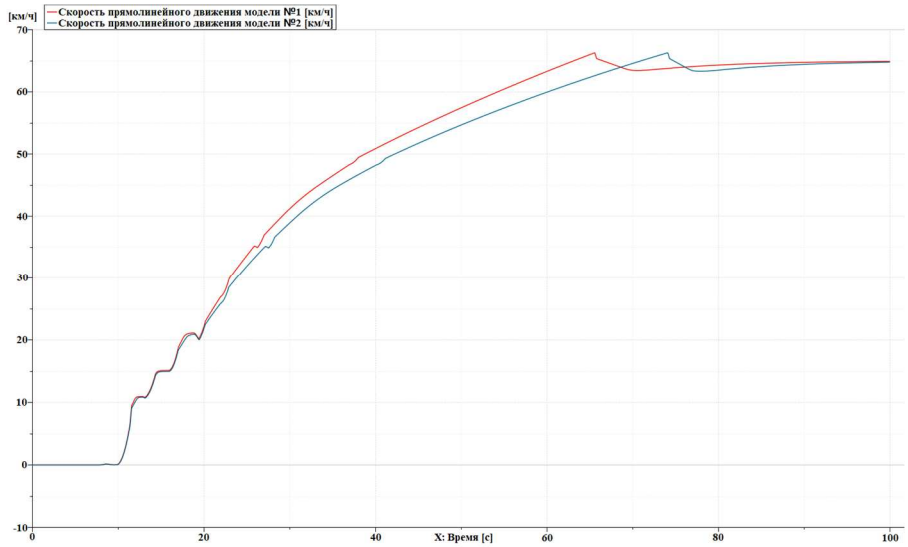


Рис. 3. График сравнения скоростей прямолинейного движения моделей

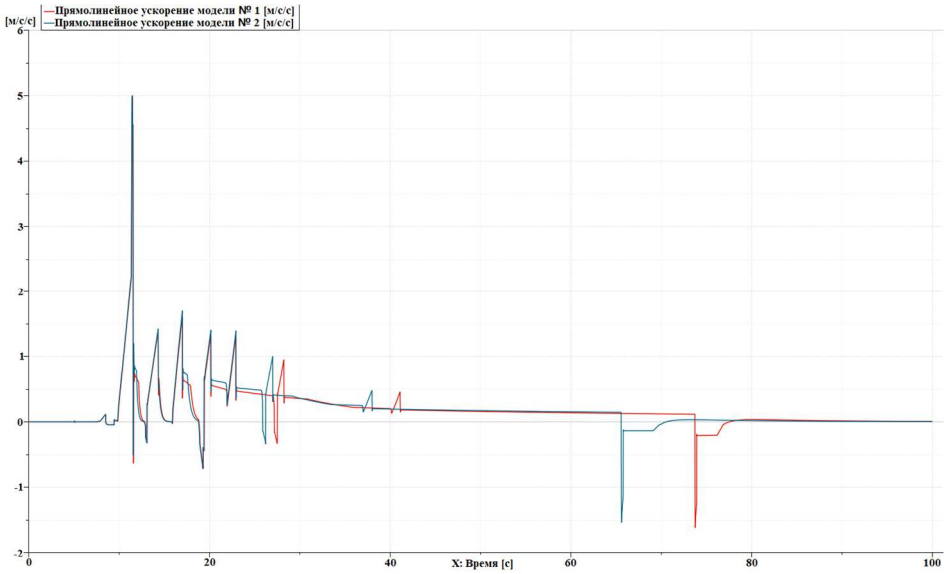


Рис. 4. График сравнения прямолинейного ускорения моделей

Характеристика разгона гусеничного шасси является одним из основных показателей, позволяющих оценить его динамические свойства. На характеристику разгона влияют массово-инерционные характеристики изделия, потери в гусеничном движителе, сопротивление движению, потери мощности на обеспечивающие агрегаты, параметры двигателя и трансмиссии, а также настройки системы управления переключением передач. Причём за счёт последних возможно качественное изменение характеристики разгона.

На основе представленных графиков и принятых основных разгонов, были проанализированы дополнительные параметры симуляции движения моделей (табл. 2). Результат реальных испытаний быстроходного гусеничного шасси на полигоне в режиме автоматического переключения передач представлен в статье [5].

Таблица 2

Сравнение скоростной характеристики моделей

Параметр сравнения	Модель №1	Модель №2	Δ_1	Δ_2
Время, затрачиваемое на достижение изделием прямолинейной скорости в 32 км/ч, сек	24,09	25,06	1,31	0,34
Время, затрачиваемое на достижение изделием прямолинейной скорости в 60 км/ч, сек	54,25	59,92	1,25	5,11
Время прохождения участка 400 м, сек	49,38	50,58	Нет данных	Нет данных

В последних двух столбцах табл. ($\Delta 1$, $\Delta 2$) представлено расхождение полученных значений имитационных моделей с реальным изделием, испытанным на полигоне. Дельта с индексом 1 относится к начальной версии модели; с индексом 2 – к более детализированной версии модели.

Стоит отметить, что разгон до 32 км/ч показывает уровень «совершенства» трансмиссии, при одинаковой удельной мощности изделия. Данный параметр применяется в стандартах НАТО при проверке разгонных характеристик изделия. Разгон до 60 км/ч – является комплексным параметром моторно-трансмиссионной установки, который отражает как параметры трансмиссии, так и параметры двигателя, так как в диапазоне от 40 км/ч разгон осуществляется за счёт характеристики двигателя. Необходимо понимать, что данные значения – важны, при анализе динамических характеристик быстроходной гусеничной техники.

Полученные результаты подтверждают рациональность введения многоколёсного шасси математической модели при оценке подвижности в диапазоне 0-32 км/ч. При этом требуется анализ и поиск причин, связанных с расхождением более 5 % на промежутке разгона 32-60 км/ч. Возможность использования модели в дальнейших исследованиях требует уточнения модели, её параметров, переучёта влияния внешней среды и введения дополнительных компонентов, для более детального описания протекающих процессов в агрегатах изделия.

Введение в модель дополнительных осей с уточнением характеристик подвески показывает, что учёт дополнительных параметров подвески в виде отдельных осей увеличивает время разгона до заданной скорости, т.к. характеристика подвески учитывает дополнительные опорные катки с приведённой жёсткостью.

При данном подходе, от проекта к проекту, разработчик накапливает как опыт построения шаблонных и обобщённых функциональных моделей, так и собственную базу таких моделей. В результате такой капитализации знаний и опыта, виртуальное функциональное моделирование в рамках каждого последующего проекта требует существенно меньших временных затрат при росте качества проектных решений.

Стоит отметить, что данная методика разработки позволяет минимизировать потери на всех стадиях проектирования, а на самых ранних из них избежать возможных критических ошибок.

Список литературы

1. Военные гусеничные машины. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1990. Т. 1. 378 с.

2. ГОСТ РВ 15.203-2001 Порядок выполнения опытно-конструкторских работ по созданию изделий и их составных частей. М.: Стандартинформ, 2020. 26 с.

3. Муганцев В.П., Рублев М.С. Моделирование движения гусеничных машин // Сборник докладов 3 научно-практической конференции: Танкостроение: состояние и перспективы. Нижний Тагил, 2008. 7 с.

4. Теория и конструкция танка / под ред. П.П. Исакова // Т.6. Вопросы проектирования ходовой части военных гусеничных машин. М.: Машиностроение, 1985. 302 с.

5. Юдинцев Д.В., Рублев М.С. Обсеспечение разгонных характеристик быстроходного гусеничного шасси за счёт оптимизации процесса управления фрикционными элементами коробки передач // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Проблемы специального машиностроения. 2018. Вып. 12. Ч. 3. 9 с.

Шадрин Иван Дмитриевич, студент, ivan.shadrin12@gmail.com, Россия, Нижний Тагил, Нижнетагильский Технологический Институт (филиал) Уральского Федерального Университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,

Юдинцев Дмитрий Владимирович, канд. техн. наук, доцент, yudin_dv@mail.ru, Россия, Нижний Тагил, Нижнетагильский Технологический Институт (филиал) Уральского Федерального Университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

POSSIBILITIES OF DESIGNING MILITARY TRACK VEHICLES IN SIEMNS IMAGINE.LAB LMS

I.D. Shadrin, D.V. Yudintsev

The article is described a complex method of the process of building a numerical model of the tracked vehicle for the analysis of its movement. The method is based on the structural model («integrated basis»), which represented as a flowchart and used at all stages of product design. Nowadays, the systems and units of modern military track vehicle (MTV) products are becoming more complicated. Systems is integrated, becoming interdependent and mutually influencing to each other. Herewith, the time allotted for the development of new and the improvement of outdated systems is reduced. As a result, the volume of work for a design engineer increases and becomes more complicated, with the same requirements for the accuracy and quality of the designed product.

Key words: military track vehicles, mathematical model, structural model, parameterization, functional model, flowchart, joint solution.

Shadrin Ivan Dmitrievich, student, ivan.shadrin12@gmail, Russia, Nizhny Tagil, Nizhnetagil'skiy Technological Institute (branch) of the Ural Federal University,

Yudintsev Dmitriy Vladimirovich, candidate of technical science, docent, yudin_dv@mail.ru, Russia, Nizhny Tagil, Nizhnetagil'skiy Technological Institute (branch) of the Ural Federal University

УДК 621.455.3

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ВНУТРЕННЯЯ БАЛЛИСТИКА»

М.В. Арсентьева

Представлены разработанные программно-методические комплексы, которые используются в учебном процессе при изучении дисциплины «Внутренняя баллистика». Приведены элементы компетенций, формируемых у студентов в процессе освоения дисциплины.

Ключевые слова: моделирование, внутренняя баллистика.

Целью освоения дисциплины «Внутренняя баллистика», преподаваемой студентам направления «24.03.03 Баллистика и гидроаэродинамика» кафедры «Ракетное вооружение» Тульского государственного университета, является формирование навыков построения математических моделей рабочих процессов в ствольных и ракетных двигателях (РД) различной степени сложности, которые обеспечили бы достоверное получение важнейших характеристик внутрибаллистического процесса.

В ходе изучения дисциплины студенты должны изучить условия и факторы, влияющие на развитие рабочего процесса, познакомиться с общими и частными теоретическими и экспериментальными закономерностями, характеризующими и сопровождающими рабочий процесс в двигателях, а также освоить методы решения внутрибаллистических задач и научиться анализировать полученные результаты.

Реализация поставленных задач осуществляется, в том числе, при проведении лабораторных работ с использованием ряда разработанных на кафедре программных продуктов.

Одним из них является программа расчета внутренней баллистики ракетных двигателей твердого топлива в термодинамической постановке с использованием основных уравнений термодинамики тела переменной массы [1]. Интерфейс программы представлен на рис. 1. Программа позволяет задавать до 4-х топливных элементов из различных составов, разной геометрии, в том числе, с помощью зависимости поверхности горения от толщины сгоревшего слоя топлива и до 3-х воспламенительных составов, также имеющих различную геометрию и разные химические составы. Результаты расчета представляются в виде графиков изменения давления в камере, тяги и в табличной форме. Тестирование разработанного программно-методического комплекса проводилось с использованием экспериментальных данных [4, 5].

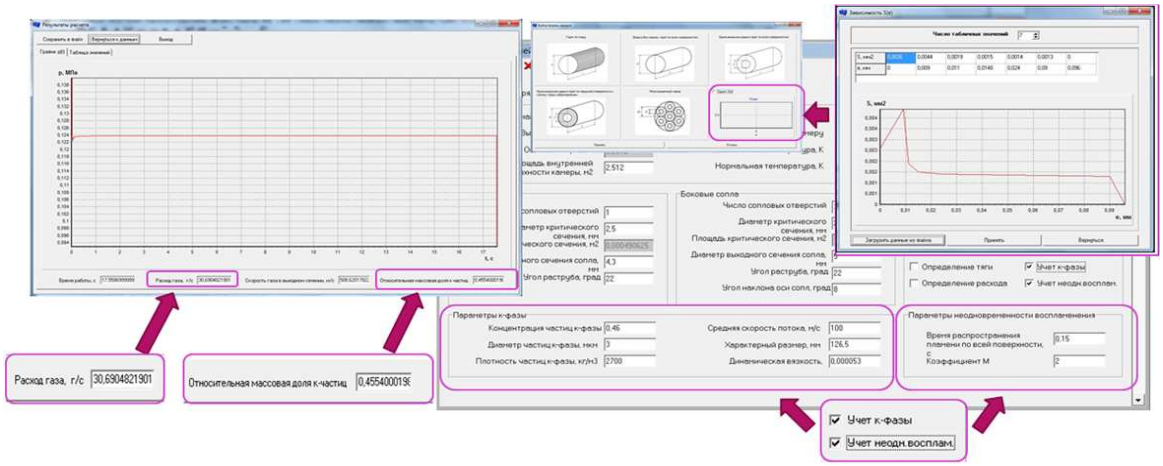
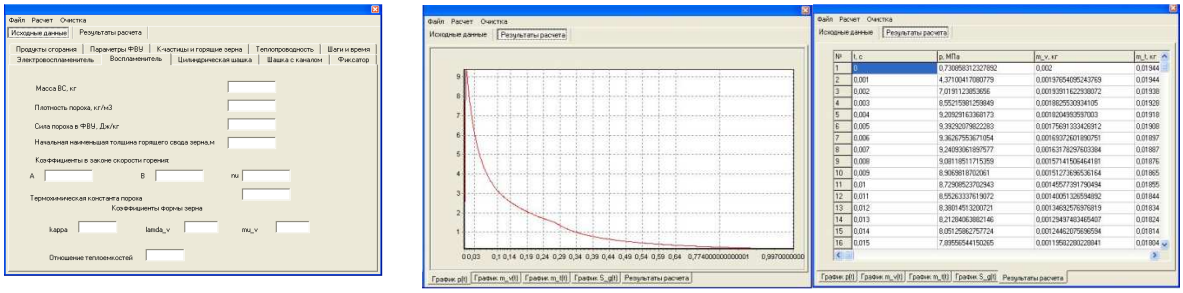


Рис. 1. Интерфейс программы внутренней баллистики в РД

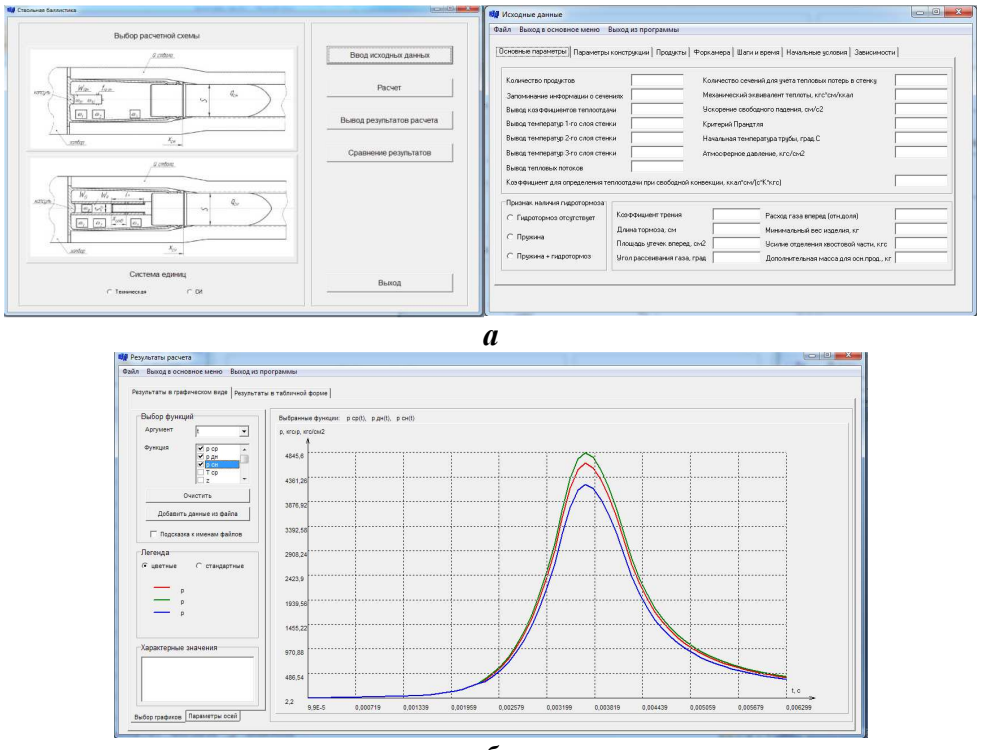
Для знакомства студентов с моделями расчета рабочего процесса в форкамерных воспламенительных устройствах (ФВУ), используемых в импульсных РД разработана программа, интерфейс которой представлен на рис. 2. Программа реализует математическую модель, изложенную в [6], и позволяет проводить расчет в ФВУ двух типов: снаряженных только зерненным составом с учетом гипотезы уплотнения состава и снаряженных двухсоставным топливным зарядом. Результаты расчета представляются в виде графиков давления в камере, оставшейся массы состава (составов), относительной поверхности горения от времени, а также в табличном виде.



а ***б***

Рис. 2. Интерфейс программы внутренней баллистики в ФВУ: а – задание исходных данных; б – результаты расчета в виде графика и таблицы

Для моделирования рабочего процесса в ствольных двигателях разработана программа, интерфейс которой представлен на рис. 3. Математическое описание, положенное в основу разработанного программно-методического комплекса, базируется на уравнениях термодинамики тела переменной массы [1, 7]. Исходные данные на экране представлены в форме «Многостраничное окно», содержащее семь вкладок: «Основные параметры», «Параметры конструкции», «Продукты», «Форкамера», «Шаги и время», «Начальные условия», «Зависимости» (рис. 3 а).



а

б

Рис. 3. Интерфейс программы внутренней баллистики ствольных систем: а – задание исходных данных; б – результаты расчета

Вывод результатов расчета осуществляется в виде таблицы и графиков, перечень которых указывает пользователь (рис. 3, б). Возможен вывод следующих зависимостей по выбору:

давления у дна ствола во времени;
среднего давления в заснарядном пространстве во времени;
давления, действующего на дно снаряда, во времени;
средней по заснарядному пространству температуры во времени;
относительной толщины сгоревшего свода от времени;
относительной массы сгоревшего топлива от времени;
скорости движения снаряда от времени;
пути снаряда от времени;
скорости откатных частей во времени;
пути откатных частей во времени;
перегрузок, действующих на снаряд, от времени;
силы сопротивления, действующей на снаряд, от времени;
текущей массы топлива от времени;
количества теплоты, отданное от газа конструкции, от времени и других.

Одновременно возможен вывод до 8-ми графиков указанных параметров, которые отображаются разными цветами, либо разными линиями (по выбору пользователя), а также предусмотрен вывод на одних осях до 3-х графиков одной и той же величины, полученной в разных условиях. Возможен вывод графиков от двух параметров – времени и пути.

Также существует возможность сравнить результаты только что проведенного расчета с результатами, полученными ранее, загрузив их из сохраненного текстового файла.

Перечисленные особенности отображения результатов расчета позволяют провести качественный анализ и установить закономерности развития процесса и выработать рекомендации к параметрам проектируемых изделий.

Тестирование программного комплекса с использованием экспериментальных данных показало хорошее согласование.

Для расчета процесса в РД, имеющих большое удлинение, разработана программа, интерфейс которой представлен на рис. 4. Разработанный программно-методический комплекс реализует математическую модель, приведенную в [2].

Все представленные программные комплексы поддерживают защиту от ошибок пользователя и обеспечивают диагностику некорректной структуры и содержания входных величин.

В каждой из разработанных программ предусмотрены функции сохранения и открытия файла исходных данных с помощью стандартных диалоговых окон операционной системы, а также сохранение результатов расчета в текстовый файл. Результаты расчета выводятся в данный файл при необходимости. Расположение информации в файле – табличное, с пояснениями выводимых величин. Для обеспечения лучшей совместимости с программой Excel в качестве разделителя значений в файлах результатов расчета используется символ табуляции. Файлы данных и результатов расчета могут храниться в произвольном каталоге.

В ходе выполнения и защиты лабораторных работ с использованием разработанных программных продуктов у студентов формируются:

1) знания:

физической природы процессов, протекающих при работе ракетных и ствольных двигателей;

математических моделей, положенных в основу расчета рабочего процесса;

методики расчета и моделирования внутрибаллистических процессов,

2) умения:

проводить расчет рабочего процесса в ствольных и ракетных двигателях;

пользоваться прикладными программными средствами для расчета рабочего процесса;

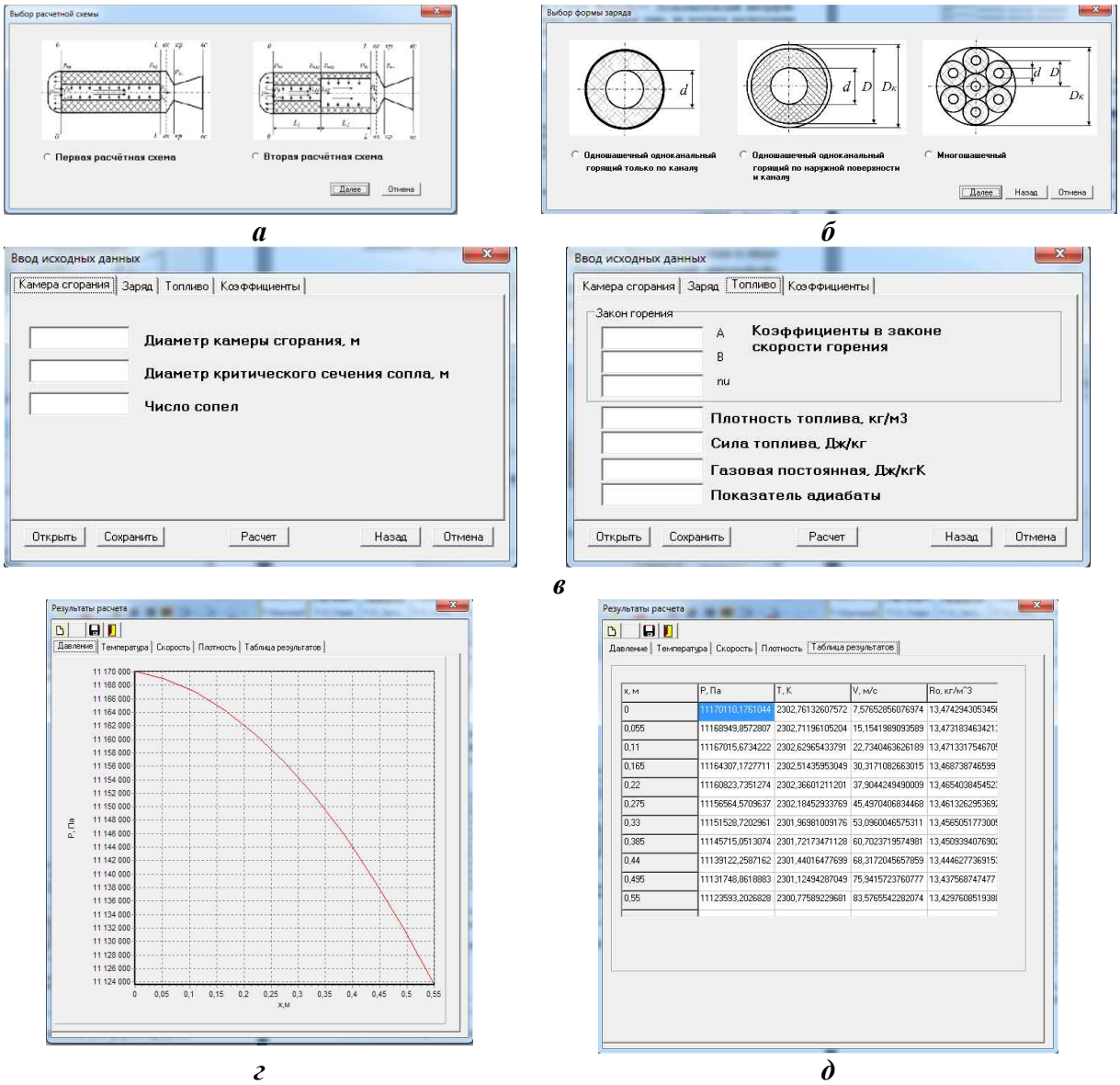
самостоятельно анализировать влияние различных факторов на протекание процессов в ствольных и ракетных двигателях,

3) владения:

навыками построения физических и математических моделей рабочего процесса;

навыками расчета рабочего процесса;

навыками обработки результатов расчета рабочих процессов.



а *б* *в* *г* *д*

Рис. 4. Интерфейс программы: а – выбор расчетной схемы; б – выбор формы заряда; в – ввод исходных данных; г – результаты расчета в виде графика; б – результаты расчета в виде таблицы

Для оценки освоения элементов компетенций в соответствии с ФГОС студентам при защите лабораторных работ задаются вопросы из фонда оценочных средств, являющегося приложением к рабочей программе по дисциплине.

Также использование представленных программных продуктов возможно при выполнении выпускных квалификационных работ и в научных исследованиях.

Список литературы

1. Арсентьева М.В., Воротилин М.С., Могильников Н.В., Сладков В.Ю., Фомичева О.А. Внутрибаллистические процессы в ствольных и ракетных двигателях: в 3 ч. Ч. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 283 с.

2. Арсентьева М.В., Воротилин М.С., Могильников Н.В., Сладков В.Ю., Фомичева О.А. Внутрибаллистические процессы в ствольных и ракетных двигателях: в 3 ч. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2020. 217 с.

3. Арсентьева М.В., Никитин В.А. Программно-методический комплекс расчета внутрибаллистических процессов в ракетных двигателях с топливными элементами сложной формы // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2017 [текст]: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 8 т. Т.8 / под. общ. ред. О.В. Миловзорова. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2017. С. 54-58.

4. Арсентьева М.В., Митин А.А., Шабалин А.Н. Особенности расчета рабочего процесса газогенераторов пиротехнических систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 12. Ч. 1. С. 44-48.

5. Арсентьева М.В. Исследование внутрибаллистических процессов в энергетических установках пиротехнических изделий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 3. С. 61-65.

6. Шипунов А.Г., Швыкин Ю.С., Юрманова Н.П. Расчет и проектирование энергетических узлов комплексов вооружения. Воспламенительные устройства: монография. Тула.: ГУП «КБП», 2000. Ч. 2. 103 с.

7. Никитин В.А., Швыкин Ю.С., Юрманова Н.П. Термодинамические основы внутренней баллистики: учебное пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2008. 180 с.

8. Арсентьева М.В., Куприк Д.А., Ложкин И.А. Расчет рабочего процесса в двигательных установках большого удлинения // Молодежь. Техника. Космос: труды XI Общероссийской молодежной науч.-техн. конф. СПб.; 2019. Т. 2. С. 234-239.

9. Арсентьева М.В. Моделирование внутрибаллистических процессов в двигательных установках большого удлинения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 3. С. 133-140.

Арсентьева Марина Владимировна, канд. техн. наук, доцент, mars_100@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

COMPUTATIONAL WORKSHOP ON THE DISCIPLINE «INTERNAL BALLISTICS»

M.V. Arsentieva

The developed software and methodological complexes that are used in the educational process when studying the discipline «Internal ballistics»are presented. The elements of competencies formed by students in the course of mastering the discipline are given.

Key words: modeling, internal ballistics.

Arsentieva Marina Vladimirovna, candidate of technical sciences, docent, mars_100@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 536.24

ПОЛУНАТУРНЫЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ»

С.И. Стреляев, О.А. Евланова, А.С. Козлов

Показана практическая часть комплексного подхода к реализации лабораторных работ на примере дисциплины инженерного профиля.

Ключевые слова: математическое моделирование, вычислительный эксперимент, полунатурное физическое моделирование, тепломассообмен, термометрия.

В [1] изложен комплексный подход к организации лабораторного практикума дисциплины «Теория и практика физического моделирования», предусмотренного учебным планом специалитета по направлению подготовки 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов». Для проведения физического эксперимента необходимы исходные данные, которые студенты предварительно получают методом математического моделирования с помощью специализированных вычислительных модулей, разработанных аспирантами и преподавателями кафедры «Ракетное вооружение» ТулГУ. Результаты такого 3D моделирования студенты могут проанализировать в визуализированном представлении (рис. 1).



Рис. 1. Визуализация результатов численного моделирования

Полунатурное физическое моделирование тепловых полей наружных поверхностей гусеничных машин, полученных в результате численного эксперимента, проводится на масштабных физических моделях, одна из которых представлена на рис. 2 [2].



Рис. 2. Внешний вид масштабной полунатурной модели

При полунатурном физическом моделировании, в лабораторных условиях, в соответствии с теорией подобия, воспроизводятся процессы конвективного и лучистого теплообмена поверхности модели с окружающей средой. Вынужденный конвективный теплообмен моделируется путем обдува модели потоком воздуха от вентилятора, лучистый поток инсоляции имитируется источником света (рис. 3).

В качестве основы одной из моделей в лабораторной работе использована пластиковая сборная модель M109A2, выпускаемая фирмой «Звезда» в масштабе 1/100. Для имитации солнечного излучения применялся облучатель мощностью 40 Вт, установленный на расстоянии 35 см от модели. Облучатель устанавливается со смещением относительно продольной оси модели, для имитации зенитного угла солнца для конкретной местности. Скорость ветра моделируется с помощью регулируемого вентилятора. На рис. 4 показаны некоторые результаты.

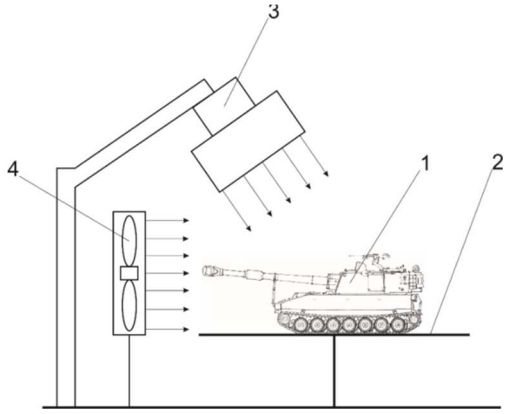


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – модель; 2 – поворотный столик; 3 – ИК лампа; 4 – вентилятор

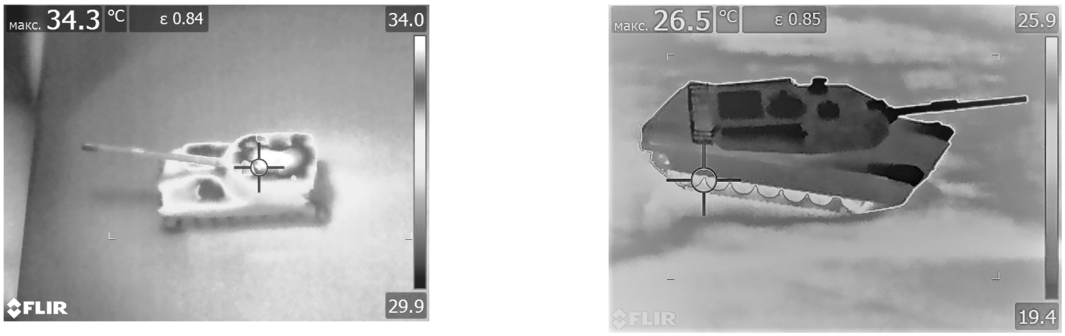


Рис. 4. Тепловизионные снимки полунатурных моделей

Корректность примененных математических и адекватность физических моделей студенты оценивают путем сравнения тепловых портретов полунатурных моделей и их компьютерных аналогов. Таким образом, в итоге выполнения цикла лабораторных работ, студенты овладевают навыками работы со специализированными компьютерными кодами для численного эксперимента по моделированию сопряженных тепломассообменных процессов, умением применять теоретические знания по теории подобия для решения конкретных практических задач, а также умением применять современную тепловизионную технику для дистанционной термометрии.

Список литературы

1. Стреляев С.И., Евланова О.А., Фомичева О.А. Вычислительный эксперимент в дисциплине «Теория и практика физического моделирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2017. Вып. 11. Ч. 2. С. 204-207.

2. Стреляев С.И. Полунатурная тепловая модель танка // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. Вып. 11. Ч. 1. С. 65–71.

Стреляев Сергей Иванович, д-р техн. наук, профессор, sergeystrel@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Евланова Ольга Александровна, канд. техн. наук, доцент, OlgEvlanova@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Козлов Александр Сергеевич, инженер, OlgEvlanova@yandex.ru, Россия, Тула, АО «КБП»

SEMI-NATURAL PHYSICAL EXPERIMENT IN THE DISCIPLINE «THEORY AND PRACTICE OF PHYSICAL MODELING»

S.I. Strelyaev, O.A. Evlanova, A.S. Kozlov

The practical part of an integrated approach to the implementation of laboratory work is shown on the example of an engineering discipline.

Key words: mathematical modeling, computational experiment, semi-natural physical modeling of heat and mass transfer, thermometry.

Strelyaev Sergey Ivanovich, doctor of engineering sciences, professor at the Department of Missile weapons, sergeystrel@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Evlanova Olga Aleksandrovna, candidate of technical science, docent, OlgEvlanova@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kozlov Aleksandr Sergeevich, ingeneer, OlgEvlanova@yandex.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»

УДК 378.147

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ПРИ КУРСОВОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПО ТЕХНИЧЕСКИМ СПЕЦИАЛЬНОСТЯМ

Л.И. Алешичева, Д.А. Дехтяр, О.А. Евланова, А.Н. Троицкий

Проведен сравнительный анализ некоторых популярных продуктов (Zoom и Skype) для проведения видеоконференций для использования в курсовом проектировании дистанционной формы обучения. Описан процесс подключения к сервисам. Указаны основные преимущества и недостатки рассмотренных инструментов.

Ключевые слова: Дистанционное обучение, курсовое проектирование, видеоконференции.

В настоящее время наблюдается значительный рост значимости дистанционных форм обучения. При проведении занятий по техническим дисциплинам в дистанционной форме возникает ряд проблем, связанных с интерактивным взаимодействием преподавателя с группой студентов, а также при проведении индивидуальных консультаций. Особенно остро данный вопрос стоит при проведении консультаций по курсовому проектированию, требующих для их эффективного проведения взаимодействия субъектов образовательной деятельности (преподавателей и студентов) с объектом (графической реализацией проекта).

В настоящее время в Тульском государственном университете взаимодействие учащихся с преподавателями происходит при помощи портала «Личный кабинет». Взаимодействие при помощи данного портала происходит исключительно в режиме обме-

на файлами и сообщениями между участниками образовательного процесса. Область применения указанного вида взаимодействия существенно ограничена его функциональными возможностями, которые реализованы к настоящему времени. При проведении консультаций по курсовому проектированию использование данного портала, без применения сторонних инструментов, затруднительно, так как требует существенных трудозатрат со стороны преподавателя, например, для объяснения ошибки или неточности в чертеже преподавателю необходимо написать исчерпывающий комментарий, который может по-разному интерпретироваться студентом. Также затрудняет работу преподавателя тот факт, что при работе с данным порталом нет возможности наглядно отобразить историю взаимодействий преподавателя с определенным студентом. Поэтому более целесообразно при дистанционном консультировании студентов использовать сторонние программные продукты, а ключевые этапы разработки проекта фиксировать в личном кабинете для официального подтверждения и контроля проведенных работ. При этом необходимо, чтобы используемые программные продукты отвечали ряду требований:

обеспечение общения преподавателя с группой студентов в онлайн режиме;

представление графических материалов без загрузки и выгрузки файлов;

сохранение истории взаимодействия;

отсутствие оплаты за использование продукта, как для преподавателя, так и для студента.

В соответствии с указанными требованиями можно выделить два программных продукта, применение которых широко распространенно в преподавательской среде: Skype, Zoom.

Skype – наиболее известная программа для общения группы людей через сеть Интернет. Программа Skype абсолютно бесплатна, для регистрации необходимо создать учетную запись по ссылке https://signup.live.com/. Отсутствуют временные ограничения по продолжительности звонка, обладает простым и понятным интерфейсом, позволяет обмениваться сообщениями и файлами. Еще одним несомненным достоинством данного продукта является функция демонстрации экрана с высоким разрешением (до 1080 p). Для демонстрации экрана пользователю необходимо нажать на кнопку «Демонстрация экрана». На рис. 1 представлен пример работы преподавателя со студентом при помощи программы Skype.

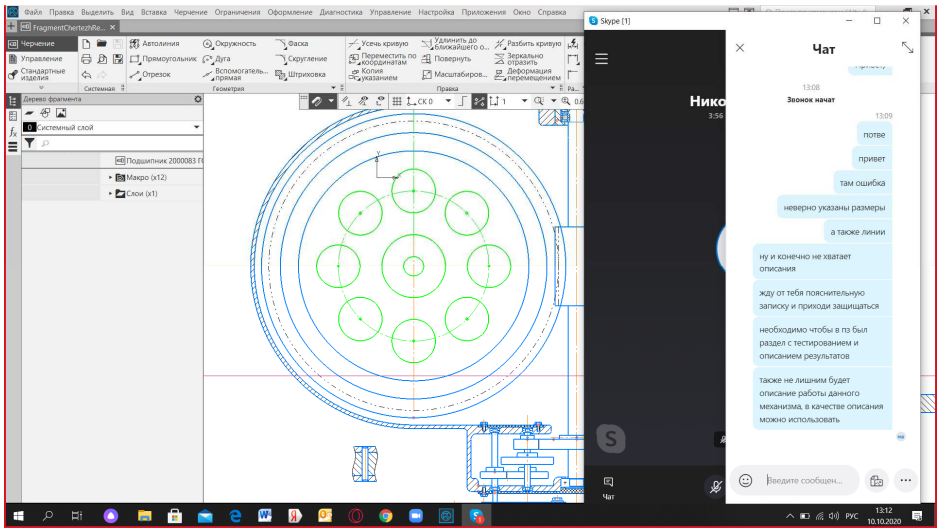


Рис. 1. Демонстрация экрана в программе Skype

Программа является кроссплатформенной. Иными словами, она может быть установлена как на компьютеры под управлением операционных систем (ОС) семейства Windows, так и под управлением Linux, Android, iOS.

К недостаткам программы Skype можно отнести отсутствие функции дистанционного управления экраном собеседника. В связи с этим недостатком преподавателю при проведении консультаций необходимо объяснять студенту место ошибки словесно, вместо того чтобы указать его графически. Кроме того, приложение требует достаточно много ресурсов, что может вызвать проблемы при использовании на старых ноутбуках и ПК.

Другим популярным программным продуктом, используемым при дистанционном обучении, является Zoom. Zoom — это сервис беспроводного взаимодействия для организации видеоконференций, вебинаров, групповых чатов. Платформа позволяет общаться посредством видео и/или аудиосвязи. Для начала конференции необходимо перейти на вкладку «Главная» и нажать «Новая конференция» (рис. 2).

Подключение к видеоконференции может происходить при помощи ссылки или идентификатора и пароля. При подключении при помощи ссылки организатор должен предоставить всем участникам ссылку на конференцию. Место размещения данной ссылки представлено на рис. 3. При подключении к конференции при помощи идентификатора и пароля организатор должен предоставить данные участникам. Участнику необходимо перейти по ссылке https://zoom.us/join и ввести идентификатор и пароль. Имеется возможность скопировать приглашение полностью, а также изменить пароль и идентификатор конференции.

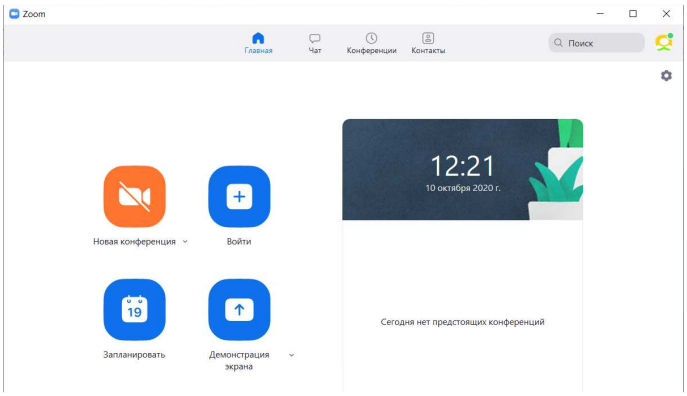


Рис. 2. Панель запуска и настройки конференций

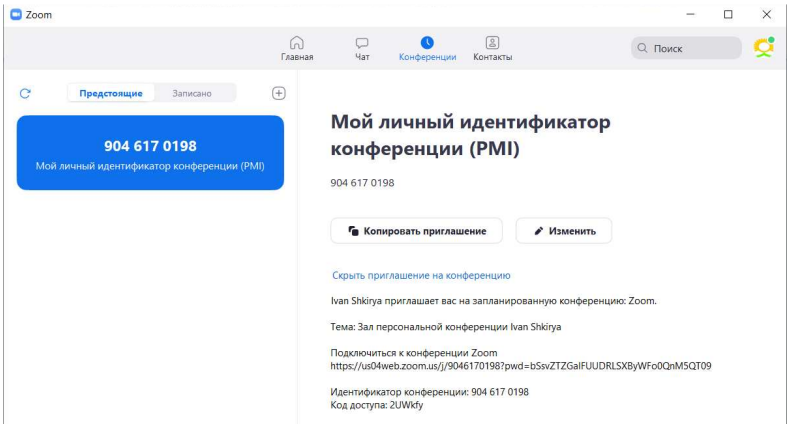


Рис. 3. Данные для подключения к конференции

К основным преимуществам данного приложения можно отнести то, что все инструменты по ведению конференции находятся в руках руководителя. Пользователь, который организовывает видеоконференцию, может включать и выключать микрофоны участников, отправлять участников в комнату ожидания, а также запрашивать включение видео или выключать его у всех участников. Данные функции представлены на рис. 4.

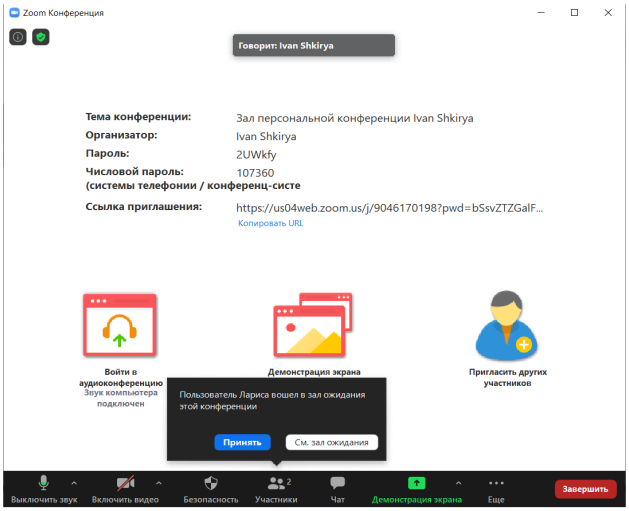


Рис. 4. Доступные функции организатора конференции

Все функции делятся на несколько разделов. Раздел «Безопасность» позволяет настроить доступы пользователей к общим инструментам конференции, таким, как чат, демонстрация экрана, переименование. В разделе «Участники» представлены функции для работы с пользователем, в частности, через этот раздел пользователя можно переместить в зал ожидания, сделать организатором, переименовать. В разделе «Демонстрация экрана» можно начать демонстрацию, а также настроить возможность демонстрации экранов других пользователей. Через раздел «Еще» можно начинать запись конференции.

Также к преимуществам приложения можно отнести возможность ведения записи конференции. Запись можно ставить на паузы в необходимых местах, а после завершения конференции ее можно разослать всем участникам. Присутствующая функция «Демонстрация экрана» позволяет не только демонстрировать весь экран, но и выбрать определенные приложения. Нельзя не отметить такую важнейшую функцию, как «Дистанционное управление», которая очень полезна при проведении консультаций по курсовому проектированию. Для включения данной функции необходимо нажать на кнопку «Настройка просмотра» - «Запрос дистанционного управления». Для пользователя, который не является организатором, расположение данной функции представлено на рис. 5, и «Дистанционное управление» для передачи управления любому пользователю конференции. Для завершения управления необходимо нажать на кнопку «Настройки просмотра»-«Передать дистанционное управление» для пользователя, который не демонстрирует свой экран, и «Дистанционное управление»-«Прервать управление» в случае, если экран пользователя демонстрируется.



Рис. 5. Запрос дистанционного управления

К основным недостаткам данного приложения можно отнести ограничение по времени в бесплатном режиме. Видеоконференции в бесплатном режиме не могут длиться дольше 40 минут. Однако данный недостаток достаточно просто решается – переподключением. Вторым существенным недостатком Zoom является достаточно сложный интерфейс. Для работы в этой программе потребуется уделить некоторое время на изучение функций интерфейса приложения.

Общий список сравнения Skype и Zoom по свойствам представлен в табл.

Сравнение Skype и Zoom

Показатель	Skype	Zoom
Демонстрация экрана	+	+
Общение группы лиц	+	+
Дистанционное управление экраном собеседники	-	+
Безопасность	Высокая	Средняя
Возможность ведения записи общения	+	+
Порог вхождения	Низкий	Высокий
Стоимость	Бесплатно	Две версии: бесплатная и профессиональная (от 15$ до 20$)

Таким образом, оба программных продукта могут использоваться при дистанционном проведении консультаций по курсовому и дипломному проектированию по техническим специальностям. Zoom эффективнее использовать для общих консультаций, в то время как Skype более эффективен при индивидуальных консультациях по курсовому проектированию.

Список литературы

1. Официальный сайт программного обеспечения skype [Электронный ресурс] URL: https://www.skype. com/ru/ (дата обращения: 10.02.2020).

2. Официальный сайт программного обеспечения zoom [Электронный ресурс] URL: https://zoom.us/ (дата обращения: 10.02.2020).

Алешичева Лариса Ивановна, канд. техн. наук, доцент, aleshicheva68@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Дехтяр Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, доцент, javelin@bk.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Евланова Ольга Александровна, канд. техн. наук, доцент, OlgEvlanova@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Троицкий Александр Николаевич, канд. техн. наук, доцент, antroitsky@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

USE OF REMOTE TOOLS IN COURSE DESIGN FOR TECHNICAL SPECIALTIES

L. I. Aleshicheva, D. A. Dekhtyar, O.A. Evlanova, A.N. Troitsky

A comparative analysis of some popular products (Zoom and Skype) for video conferencing for use in course design of distance learning is carried out. The process of connecting to services is described. The main advantages and disadvantages of the considered tools are indicated.

Key words: distance learning, course design, video conferences.

Aleshicheva Larisa Ivanovna, candidate of technical sciences, docent, aleshicheva68@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Dekhtyar Dmitriy Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, javelin@bk.ru, Russia, Tula, Tula State University,

YevlanovaOl'gaAleksandrovna, candidate of technical sciences, docent, OlgEvlanova@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Troitskiy Aleksandr Nikolayevich, candidate of technical sciences, docent, antroitsky@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 623.1.7

ФОРМИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ОСНОВЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ТРЕНАЖЁРЕ ПО УКЛАДКЕ КУПОЛА ПАРАШЮТНОЙ СИСТЕМЫ

Б.Ю. Мордакин

Проведен анализ деятельности специалистов воздушно-десантной подготовке по укладке купола парашютной системы. Представлено описание информационная основа деятельности специалиста и её структура. Создана модель информационной деятельности по укладке с возможностью применения в создании тренажера укладки купола парашютных систем.

Ключевые слова: десантирование грузов, информационная основа деятельности, модель деятельности гиперсети.

Десантирование различных грузов из военно-транспортных самолетов с помощью парашютных систем находит сегодня широкое применение. Для этих систем разработчик решает задачи: во-первых, извлечение объекта из самолета и, во-вторых, приземление его с заданной вертикальной скоростью.

Парашютные системы состоят из нескольких куполов и применяются для того, чтобы реализовать определенное движение объекта в пространстве, обеспечить требуемую траекторию снижения и необходимые кинематические параметры объекта в характерные моменты времени [1,2].

Вместе с тем, для обеспечения правильной работы парашютной системы требуется её безошибочная укладка.

Действие «уложить» означает, что нечто сложено в каком-нибудь порядке; складывая, уместить, наполнить вещами, упаковать [3].

В нашем случае под укладкой купола парашютной системы подразумевается комплекс мероприятий подготовки, последовательного уложения полотнищ и строп купола, и их проверки для обеспечения раскрытия и безопасной скорости снижения объекта до приземления.

Особенностью купола парашютной системы является то, что он представляет собой незамкнутую, мягкую (тканевую), растяжимую, воздухопроницаемую конструкцию, усиленную каркасом и снабженную стропами и соединительными звеньями для связи с объектом. Стропы, соединительные звенья и усилительный каркас выполняются из текстильных лент и шнуров.

Проведенный анализ работ и изучение деятельности специалистов в основном посвящены изучению операторской деятельности. Работа же по укладке является профессией не операторского типа, требующей особого подхода.

В данном виде деятельности ситуация всегда представлена в естественном виде и нет необходимости умственно строить объект управления, поскольку человек связан с ним непосредственно [4].

Выполнение специалистом профессиональной деятельности по укладке купола парашютной системы требует описания информационного обеспечения, информационной основы (ИОД), что позволяет использовать ее в качестве основы для организации обучения. В дополнение к этому, потребность в информационной основе деятельности укладчика возникла в связи с возможностью создания моделей ИОД и переносом их в тренажёр.

В работе В.Д. Шадрикова информационная основа деятельности — это совокупность информации, характеризующей предметные и субъективные условия деятельности в соответствии с вектором «Цель-результат» [5].

В зависимости от цели деятельности, конкретных условий ее реализации, включая и уровень профессионализации, ИОД может выступать в форме чувственного образа, образа-представления, совокупности дискретных информационных, признаков, в виде структуры знаний, совокупности понятий и т.д. [6].

ИОД в процессе деятельности функционирует как в форме целостного образа, так и в форме дискретного отражения, т.е. в виде набора отдельных признаков, сигналов, параметров [4].

Форма отражения ситуации в составе ИОД зависит от цели деятельности и от конкретных условий ее реализации. Переход от целостного отражения ситуации к дискретному и наоборот, если этого требует содержание цели трудовой деятельности, рассматривается в качестве ведущей характеристики, сформированной информационной основой деятельности [6].

Специалисты ВДП выполняют укладку купола с целью обеспечить равномерное и правильное раскрытие, а также безопасную скорость снижения объекта до его приземления.

Реализуя основную технологическую цель деятельности, специалист производит следующие действия: раскладывает купол на укладочном столе или полотнище; производит рифление купола (не на всех куполах); укладка купола, проверка правильности укладки.

Разберем их подробнее. Укладывающий раскладывает купол на укладочном столе или полотнище так, чтобы маркировка завода была сверху, далее расправляет полюсную часть купола, осматривает купол на наличие дефектов. Цель действия состоит в том, чтобы проверить и подготовить купол к укладке.

Далее специалист ВДП выполняет рифление, выполняя при этом следующие действия: присоединяет звено рифления к петле, последовательно продевает его в каждый люверс на полотнище купола, соединяет элементы купола вручную в определенном порядке. Цель действия состоит в том, чтобы замедлить раскрытие купола для стягивания нижней кромки основного парашюта до определенного диаметра в процессе введения парашютной системы (ПС) в рабочее состояние.

Используемая в деятельности по укладке информация относится к выполнению отдельных действий. В качестве методических приёмов изучения деятельности использовалось изучение руководства по эксплуатации и документации, личный опыт, анализ деятельность инструкторов. Предшествующей задачей в данном виде деятельности специалисту требовалось определить: тип ленты, нахождение метки на ленте, положение купола и перейти к их отысканию. Далее специалист выбирает звено, привязывает к петле и, не перекручивая, продевает его в люверсы, равномерно распределяя по периметру купола.

Укладка состоит из повторяющихся действий и операций, характеризующихся последовательным выполнением работ, согласно инструкции к определённой парашютной системе. Действия специалиста связаны с мыслительным процессом определения конструкции купола, геометрии и расцветки его частей с целью выполнения укладки.

Информационную основу в этом случае составляют цветовые и геометрические параметры муфт строп, маркеры, нанесенные на усилительную ленту каркаса купола, полотнище. В процессе укладки обеспечивается необходимое относительное расположение частей и производится проверка правильности положения строп и купола.

Техника укладки начинается с разделения и нахождения стропы и полотнища. Выбор стропы определяется с помощью использования сенсорного анализа по распознанию формы, цвета, цифры, клейма на полотнище. Деятельность заключается в последовательном сложении указанным порядком купола парашюта до полотнища с определённой стропой включительно, равномерно расправляя полотнища от нижней кромки купола до его вершины и равномерно распределяя между люверсами звена рифления. Цель действия состоит в том, чтобы раскрытие купола прошло правильно и равномерно в процессе введения ПС в действие. Источником информации этого действия являются: содержание руководства по эксплуатации, тип стропы, сложение, метки на ленте, положение купола и строп. Специалист выполняет фальцовку полотнища, выбирая стропу, фиксируя стропы рукой и полотнища коленом, равномерно разравнивая полотнища от нижней кромки купола до его вершины.

В заключении выполняется проверка правильности укладки при помощи нахождения контрольных строп, их положения и отсутствия закрутки. Цель состоит в исключении неправильного раскрытия и работы купола парашютной системы.

В процессе деятельности укладчик отражает и контролирует некоторую совокупность технологических параметров, входящих в деятельность по укладке парашютной системы представленных в табл. 1.

Таблица 1

Описание информационной основы деятельности специалиста

Цель действия	Содержание исполнительной части действия	Используемая информация, характеризующая объективные условия
1	2	3
1. Расправка купола	Принятие решения на раскладку купола, вытягивание парашюта, расправка полюсной части купола, разделение купола пополам на укладочном столе или полотнище	Сведения о строении купола, маркировка завода на полотнище, стропа с номером на радиальной ленте кромки купола, цвет стропы или муфты
2. Найти петлю присоединения звена, рифление купола	Найти стропу, перебросить левую половину купола на правую, найти петлю	Сведения о строении купола, присоединение строп к куполу, их маркировка на ленте радиального каркаса, петля красного цвета
3. Установка звена рифление купола	Моторные навыки, привязка одного конца звена без метки, расправка звена, последовательность продевания в люверсы сверху вниз, снизу вверх, привязка середины звена с меткой, продевание звена в чехол резаков, совмещение между собой оба конца звена рифления в местах с одинарной меткой	Сведения о строении люверсов, тип соединение звена, визуальный контроль продевания и отсутствия перекрученного звена, метки
4. Подготовка к укладке	Найти стропу по номеру (цвету), перебросить левую половину купола на правую, найти дополнительную стропу, отделение влево от общего пучка строп, взять рукой в месте соединения с куполом, удержать рукой на середине стола, положить на неё стропу следующей сверху, вытянуть влево полотнище, находящееся между ними по радиальной ленте, подравнять нижнюю кромку и расправить купол до вершины.	Сведения о строении купола, присоединение строп к куполу, их маркировка на ленте радиального каркаса, визуальный контроль за положением строп и полотнища

Окончание табл. 1

1	2	3
5. Выполнение укладки	Ведущее движение: моторное, от соединения стропы с кромкой купола полотнища, ведет по кромке радиальной ленты полотнища влево, образуя угол 90^0 между стропой и сложением радиальной ленты кромки полотнища купола до вытягивания следующей стропы, вкладывание и выравнивание стропы с имеющейся стропой в руке, удержание строп на середине стола, повторение складывания до полотнища с заводской маркировкой, привязка строп, перехват строп и повтор с правой половиной (равномерно распределяя между люверсами звено рифления со слабиной 0,25 - 0,30 м).	Визуальный контроль количества строп по номерам на усилительной радиальной ленте полотнищ, до маркировки полотнища, перехват в другую руку пучка строп
6. Формирование кромки	Ведущее движение: моторное подтягивание и подравнивание нижней кромки и расправки купола до вершины, левой половины купола и правой	Визуальный контроль правильного сложение кромки до маркировки полотнища
7. Поддержание формы кромки	Ведущее движение: моторное, подтягивание, подравнивание всей кромки	Визуальный контроль правильного сложение кромки и маркировки
8. Обвязка купола	Перевязать купол в трех местах легко развязываю-щимся узлом, продев ленты в петли серого цвета, расположенные на ленте радиального каркаса купола парашюта стропы и, обхватив купол вокруг, при этом узлы должны располагаться справа от петель серого цвета	Визуальный контроль правильного продевания лент в петли и завязки
9. Проверка правильности расположения строп	Снять монтажную завязку из шнура ШХБкр-36 красного цвета, одинарная метка на звене рифления должна находиться около стропы, встряхнуть стропы, при этом один из укладывающих придерживает пучок строп у нижней кромки купола, приподнять у нижней кромки уложенного парашюта укладочной линейкой стропы с опознавательными муфтами с их правыми и левыми дополнительными стропами, муфтами зеленого цвета и, придерживая их, пройти вдоль строп до места их пришивки к звену.	Визуальный контроль радиальной ленты полотнищ развязки шнуров, наличие заводской маркировки полотнища, обхватив купол вокруг, узлы справа от петель серого цвета отделения строп по цвету на усилительной, стропы не закручены и не запутаны, положение строп у места их пришивки на звенья парашюта сверху к центру

Все технологические параметры тесно связаны между собой, и определенное изменение одного из них приводит к существенным перестройкам других. Параметры опознаются человеком через их отдельные проявления, которые начинают выступать в качестве их признаков. Каждый параметр может находиться в различных состояниях, которые также идентифицируются на основе различных признаков [6].

Информационная основа деятельности (ИОД) также определяется как совокупность признаков, характеризующих предметные и субъективные условия труда специалиста [3].

Признак — это доступное зрительному восприятию свойство объекта [7].

В процессе деятельности укладчика задействуется набор технологических параметров, определяющих ситуацию, и имеющих такие признаки как цвет, длинна, форма частей, деформация, и др.

В основе лежат структурно-функциональные признаки частей парашютной системы.

Они несут информацию, используемую в процессе программирования и выполнения трудовых действий. Эти характеристики элементов технических устройств имеют решающее значение при формировании концептуальных моделей, планов деятельности, отражают ее внутреннее строение [7].

Всякий образ, который воспринимает специалист ВДП, имеет прямое отношение к конкретному условию производственной задачи. Именно поэтому начинается сознательный выбор, сопоставление по различным признакам.

Данные признаки используемых в укладке частей купола парашютной системы относятся к функционально-постоянным. Они определяют назначение и структурную взаимосвязь элементов технического устройства и не изменяются в процессе деятельности. Специалист ВДП выделяет признаки частей на основе зрительного восприятия и сенсорного анализа с активным участием мыслительных процессов. Снятие информации с конструктивных точек происходит последовательно, с разной периодичностью.

В ходе освоения деятельности укладчик познает отмеченные связи и использует их в процессе регуляции. Параметры познаются человеком через их отдельные проявления, которые начинают выступать в качестве их признаков. Каждый параметр может находиться в различных состояниях, которые также идентифицируются на основе различных признаков (табл. 2).

Использование структуры связей между различными компонентами объективных условий трудовой деятельности отмечается в ряде работ [8, 9, 10].

Таблица 2

Параметры укладки и их признаки

Параметры	Признаки
1. Маркировка стропы, полотнища, звена, петли	1. Сличение номера, метки, цвет части
2. Деление, переброска купола	2. Форма, мягкость, растяжимость, метка
3. Завязка звена, шнура	3. Форма, мягкость, растяжимость номер, метка
4. Продевание в люверсы, карманы резаков	4. Жесткость, форма, мягкость, растяжимость
5. Удержание строп у основы пришивки к радиальной усилительной ленте кромки полотнища на центре укладочного полотнища без отрыва от него	5 Номер, форма, мягкость, растяжимость, сила удержания
6. Формирование сложения движением руки от стропы по радиальной усилительной ленте кромки полотнища купола до выхода следующей стропы (равномерно распределяя между люверсами звено рифления)	6. Форма, мягкость, растяжимость, сила удержание, движение, номер
7. Угол отвода полотнища 90^0	7. Форма, мягкость, растяжимость, движение.
8. Вкладывание стропы в руку у основы пришивки к радиальной ленте	8. Сличение номера, форма, мягкость, растяжимость
9. Натяжение сложения полотнища	9. Форма, мягкость, растяжимость, движение натяжение
10. Фиксация сложения коленом	10. Форма, мягкость, растяжимость, сила тяжести
11. Перебрасывание половины купола	11. Форма, мягкость, растяжимость, метка
12. Ровность сложений	12. Форма, мягкость, растяжимость, метка
13. Не пропуск строп	13. Форма, мягкость, растяжимость, метка, номер
14. Отсутствие ошибок	14. Форма, мягкость, растяжимость, метка, номер

Из сказанного следует, что структура ИОД является не теоретической абстракцией, а результатом отражения объективно существующих взаимосвязей между отдельными компонентами технологического процесса. Поскольку связи существуют реально, то их необходимо учитывать в ходе деятельности. Поэтому формирование структуры ИОД выступает как необходимое условие для адекватного отражения предметных и субъективных условий трудовой деятельности. Совокупность взаимно скоординированных параметров и признаков действия укладки купола, представим, как структуру ИОД и рассмотрим с помощью применения математического аппарата теории графов.

В процессе укладки купола и придания конструкции определённой формы, обучаемый анализирует совокупность параметров и признаков изделия. Данная модель строится по следующим правилам: вершины графа сопоставляются параметрами и признаками деятельности по укладке купола; ребра – переход от одних параметров и признаков к другим связям. Две вершины графа соединяют ребром тогда и только тогда, когда между соответствующими параметрами и признаками существует связь.

1. Пусть $B = \{B_i\}_{i=1}^{n}$ – количество параметров и признаков действия.

2. Граф связей G=*G(B,S)* – это неориентированный граф, в котором множество вершин $B = \{B_i\}_{i=1}^{n}$ описывает параметры и признаки действия, а множество ребер S – позиционные связи и размерные связи между параметрами и признаками, которые используются для укладки. Ребро $s_{ij} = \{b_i, b_j\} \in S$ соединяет вершины b_i *и* b_j тогда и только тогда, когда между соответствующими параметрами и признаками есть связь.

В общем случае, укладка купола может достигаться за счет одновременной реализации нескольких связей. По этой причине ИОД представляет собой совокупность, заданную на множестве параметров, признаков и связей между ними.

Гиперсетевая модель структуры ИОД является содержанием деятельности по укладке купола, правильной последовательности его формирования с учётом особенностей купола и действий специалистов ВДП. Она описывает связи и взаимную скоординированность использования параметров и признаков, которые достигаются посредством реализации этих связей.

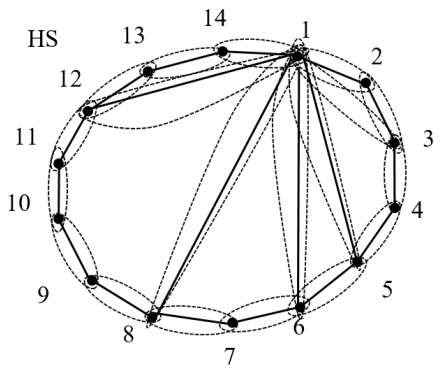
3. Гиперсетью называется вектор вида:

$$HS = (B, A, R, P, F, W), \quad (1)$$

где $B = \{b_1, \dots b_n\}$ – множество вершин; $A = \{a_1, \dots a_q\}$ – множество ветвей; $R = \{r_1, \dots r_m\}$ – множество ребер; P – отображения вида $P: A \to 2^B$, ставящее в соответствие каждой ветви множество инцидентных вершин $P(a) \subseteq B$. Отображение P определяет на множестве вершин B гиперграф $PS = (B, A, P)$; F – отображение вида $F : R \to 2_{PS}^{A}$, сопоставляющее каждому ребру $r \in R$ множество $F(r) \subseteq A$ ветвей, причем семейство подмножеств 2_{PS}^{A}, содержит только связные фрагменты гиперграфа PS. Отображение F определяет на множестве ветвей V гиперграф $FS = (A,R,F)$; W – отображение вида $W : R \to 2^{P(F(r))}$, ставящее в соответствие каждому ребру $r \in R$ подмножество $W(r) \subseteq P(F(r)) \subseteq B$ его вершин, где $P(F(r))$– множество вершин в PS, инцидентных ветвям $F(r) \subseteq A$. Таким образом, отображение W задает гиперграф $WS = (B,R,W)$.

Гиперграф $PS = (B,A,P)$ называется первичной сетью гиперсети HS, а гиперграф $WS = (B,R,W)$ – ее вторичной сетью. Гиперграф $FS = (A,R,F)$ служит для связи первичной и вторичной сетей. Упрощенно гиперсети можно понимать как объединение первичной PS и вторичной WS сетей такое, что ребра вторичной сети включают в себя вершины, которые образуют связные фрагменты первичной сети.

Графически гиперсети ИОД, представляющие все особенности параметров и признаков, показаны на рисунке.



Гиперсети информационной основы деятельности

Гиперграф *PS = (B,A,P)* называется первичной сетью гиперсети *HS*, а гиперграф *WS = (B,R,W)* – ее вторичной сетью. Гиперграф *FS = (A,R,F)* служит для связи первичной и вторичной сетей. Упрощенно гиперсети можно понимать, как объединение первичной *PS* и вторичной *WS* сетей такое, что ребра вторичной сети включают в себя вершины, которые образуют связные фрагменты первичной сети.

На рис. отображено влияние определённых параметров, их признаков и связей на формирование действия по безошибочной укладке, и моменты, на которые необходимо обращать внимание специалисту. Моделирование таких параметров и признаков будет рассмотрено в следующих статьях исследуемой тематики.

Таким образом, проведённый анализ деятельности специалиста по укладке купола, позволяет сделать следующие выводы:

1. Информационную основу исполнительных действий специалиста при укладке купола парашютной системы составляют параметры, их структурно-функциональные признаки и связи между ними, основу которой составляет сенсомоторный навык.

2. Использование гиперсети позволяет построить последовательность формирования информационной основы деятельности специалиста и возможность корректировки для лучшего формирования навыка специалиста при индивидуальном подходе к обучению.

3. Создание модели информационной деятельности по укладке с последующим переносом в тренажер укладки купола парашютной системы.

Список литературы

1. Рысев О.В., Пономарев А.Т. Парашютные системы / О.В. Рысев, А.Т. Пономарев и др. М.: Наука. Физматлит, 1996. 288 с.

2. Лобанов Н.А. Основы расчета и конструирования парашютов. М.: Машиностроение, 1965. 363 с.

3. Ожегов С.И., Шведова Н.Ю. Толковый словарь русского языка. 6500 слов и фразеологизмов. 26-е издание, пер. и доп. М.: Оникс, 2010. 1200 с.

4. Шадриков В.Д. Психология деятельности и способности человека: учебное пособие, 2-е изд, перераб. и доп. М.: Издательская корпорация «Логос», 1996. 320 с.

5. Шадриков В.Д. Проблемы системогенеза профессиональной деятельности. М.: Наука, 1982. 184 с.

6. Поваренков Ю.П. Динамика отражения структуры информационной основы деятельности на различных этапах профессионализации: дис. ... канд. психол. наук. Яросл. гос. ун-т, Ярославль. 1984. 251 с.

7. Ломов Б.Ф. О некоторых критериях оценки сигналов, несущих информацию человеку-оператору // В кн.: Проблемы инженерной психологии: (Материалы конференции). Л., 1965. С. 134-150.

8. Котик М.А. Саморегуляция и надежность человека оператора Таллин: Валгус, 1974. 171 с.

9. Ломов Б.Ф. О путях построения теории инженерной психологии на основе системного подхода // В кн.: Инженерная психология. Теория, методология, практическое применение. М.: Наука, 1977. С. 31-54.

10. Ошанин Д.А. Предметное действие как информационный процесс // Вопросы психологии, 1970. № 3. С. 34-50.

Мордакин Борис Юрьевич, канд. военных наук, докторант, mbour@mail.ru, Россия, Рязань, Рязанское гвардейское высшее воздушно-десантное ордена Суворова дважды Краснознаменное командное училище имени генерала армии В.Ф. Маргелова

FORMATION OF THE CONTENT OF THE INFORMATION BASIS OF ACTIVITY IN THE SIMULATOR FOR LAYING THE DOME OF THE PARACHUTE SYSTEM

B.Yu. Mordakin

The analysis of the activities of specialists in airborne training for laying the canopy of the parachute system is carried out. The description of the informational basis of the specialist's activity and its structure is presented. A model of information activity on packing was created with the possibility of using it in creating a simulator for packing a canopy of parachute systems.

Key words: landing of cargo, information basis of activity, model of activity, hypernets.

Mordakin Boris Yurievich, candidate of military sciences, doctoral student of the research department, mbour@mail.ru, Russia, Ryazan, Ryazan guards higher airborne order of Suvorov, red banner command school named after General of the army V. F. Margelov

УДК 629.3.072.8

ПРИМЕНЕНИЕ 3D-МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОПЕРАТОРОВ ПТРК

А.Л. Дружинин, И.П. Жабин

Предложен вариант использования масштабных 3-D моделей объектов вооружения и военной техники для подготовки операторов противотанковых ракетных комплексов (ПТРК). Использование 3-D моделей позволяет производить отработку практических вопросов по поиску, распознаванию и обстрелу учебных целей во всём диапазоне дальностей применения ПТРК «Корнет».

Ключевые слова: подготовка операторов ПТРК, 3-D модель, поиск, распознавание и обстрел целей.

Эффективность боевого применения ПТРК в различных условиях: современного боя во многом определяется уровнем обученности операторов [1]. Анализ современных тенденций развития ПТРК и результаты исследований, проводимых в данной предметной области, показывают возрастание объема и роли общих знаний оператора в алгоритме боевого функционирования, которые включают знание основ боевых действий артиллерийских подразделений, визуального отображения бронеобъектов вероятного противника, умение действовать в сложных и нештатных ситуациях и многое другое [2].

При этом очень часто в процессе обучения операторов ПТРК возникают проблемы, связанные с недостаточным количеством учебно-тренировочных средств, а также невозможностью оборудования учебных позиций для тренировок операторов поиску, распознаванию и сопровождению реальных целей во всём диапазоне дальностей стрельбы комплекса.

Для решения данных проблем специалистами Центра подготовки специалистов АО «КБП» был разработан, изготовлен и внедрен в практику обучения мобильный комплект учебных средств для подготовки операторов ПТРК включающий:

масштабные макеты целей;

планшеты для тренировки распознавания целей и определения дальности до них;

учебно-тренировочные карты;

персональный компьютер (планшет) с учебными материалами занятий.

Набор масштабных макетов объектов вооружения и военной техники используется для тренировки операторов ПТРК в поиске, распознавании целей и определении дальности до них.

В качестве прототипов для масштабных макетов были выбраны получившие наибольшее распространение объекты бронетанкового вооружения и колесной военной техники: танки «Абрамс» (США), «Леопард» (ФРГ), «Леклерк» (Франция), «Меркава»

(Израиль), Т-64 (СССР); боевая машина пехоты БМП-3 (Россия); командно-штабная машина БМП-1КШ (СССР); образцы колесной техники – автомобили Зил-130 и «Хаммер».

Для разработки 3-D моделей данных объектов использовался программный пакет «SolidWorks» (рис. 1), а их прототипирование осуществлялось на 3D-принтере «STRATASYS» серии F123.

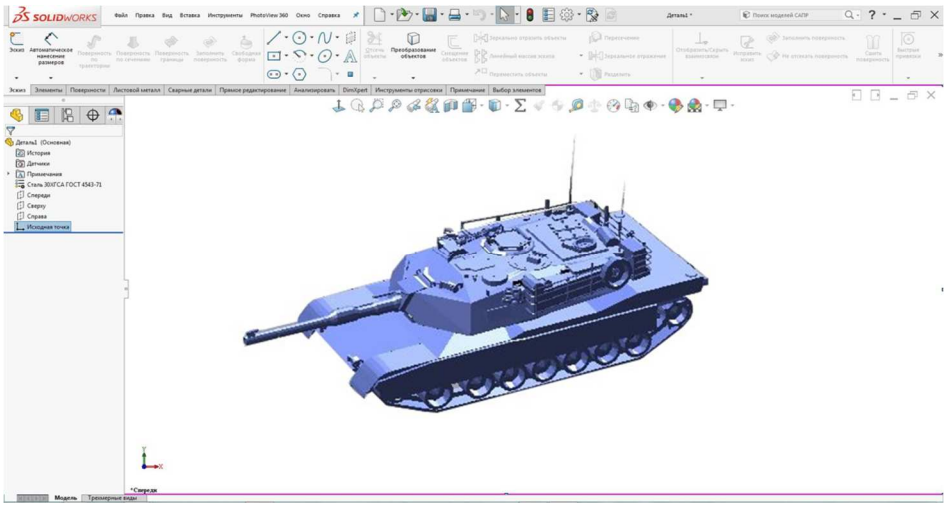


Рис. 1. 3D модель танка «Абрамс»

После изготовления на масштабные макеты было нанесено соответствующее камуфлирующее окрашивание и защитное покрытие для обеспечения использования их в условиях жаркого климата при высокой солнечной активности (рис. 2).



а ***б*** ***в***

Рис. 2. Масштабные модели танков: а – «Леопард»; б – «Меркава»; в – «Абрамс»

С целью обеспечения возможности моделирования обстрела подвижных целей была изготовлена подвижная радиоуправляемая платформа для размещения на ней масштабных макетов. Данная платформа позволяет моделировать движение модели в боковом, фронтальном и диагональном направлениях относительно позиции пусковой установки (рис. 3).

Разработанные масштабные макеты целей позволяют даже в условиях ограниченного пространства производить качественную отработку следующих учебных вопросов с операторами ПТРК: поиск и распознавание целей, определение дальности до цели, сопровождение подвижной цели, обстрел неподвижных и подвижных целей, находящихся на различных дальностях, выбор приоритетных целей для первоочередного поражения, обстрел групповых целей, в том числе и при движении в колонне.

Одним из отрабатываемых при подготовке операторов ПТРК вопросов является определение ориентировочной дальности до цели, которое осуществляется по дальномерной шкале визирной сетки прицела-прибора наведения пусковой установки (рис. 4).



Рис. 3. Подвижная платформа с моделью танка «Абрамс»

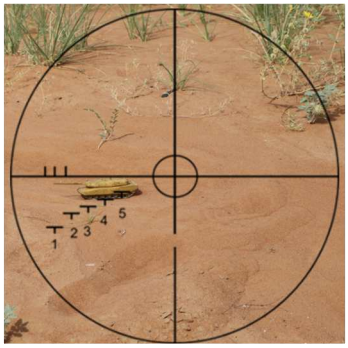


Рис. 4. Определение дальности по дальномерной шкале визирной сетки прицела-прибора наведения

Для тренировки операторов ПТРК используются макеты различных масштабов – 1:80, 1:100, 1:120. Устанавливая данные макеты на местности на удалении 50…100 м от пусковой установки, можно смоделировать расположение учебных целей на дальностях от 2000 до 10000 м от реальной огневой позиции.

Еще одним важным вопросом, отрабатываемым с операторами ПТРК, является распознавание целей. Обучение распознаванию различных типов целей проводится с помощью специальных таблиц, в которых приведены внешний вид и основные характеристики вероятных целей (танков, боевых машин пехоты, бронетранспортеров, бронеавтомобилей).

По характерным обводам цели и её габаритным размерам обучаемый производит распознавание цели и вносит записи в специальный бланк: тип цели и дальность до неё; тип и индекс управляемой ракеты, которую необходимо выбрать для поражения данной цели; ориентировочное время полета ракеты до цели. После этого обучаемый должен определить необходимое количество ракет для обстрела данной цели с целью её гарантированного поражения.

При тренировке операторов в обстреле групповых целей, в том числе движущихся в составе колонны (рис. 5), преподаватель-инструктор имеет возможность моделировать различную последовательность движения целей в колонне.



Рис. 5. Моделирование движения объектов в составе смешанной колонны

Выбор наиболее приоритетных целей производится оператором исходя из нанесения максимального ущерба технике в колонне при обеспечении возможной блокировки (остановки) колонны, исходя из наличия управляемых ракет определенного типа (с кумулятивной или термобарической боевой частью).

Таким образом, использование разработанных масштабных макетов образцов бронетанкового вооружения и военной техники позволяет отработать весь спектр учебных вопросов, входящих в состав программы обучения операторов ПТРК. Преподаватель-инструктор с помощью комплекта масштабных макетов имеет возможность моделирования практически любых условий боевого применения ПТРК «Корнет» на всех дальностях стрельбы с минимальными временными и материальными затратами на организацию и проведения обучения.

Список литературы

1. Жабин И.П., Логвинов С.С. Тренажеры операторов противотанковых ракетных комплексов: учебное пособие. Тула: ТАИИ, 2004. 211 с.

2. Сергеев С.Ф. Методология проектирования тренажеров с иммерсивными обучающими средами // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, 2011. № 1 (71).
С. 109 – 114.

Дружинин Андрей Львович, канд. техн. наук, доцент, ведущий инженер, jip61@rambler.ru, Россия, Тула, АО «КБП»,

Жабин Игорь Петрович, канд. техн. наук, доцент, начальник отдела, jip61@rambler.ru, Россия, Тула, АО «КБП»

APPLICATION OF 3D REPLICAS OF WEAPONRY & MILITARY HARDWARE FOR OPERATORS TRAININGS

A.L. Druzhinin, I.P. Zhabin

It`s been suggested a variant of 3D-replicas of weaponry & military hardware for training of anti-tank weapons operators. Using 3D replicas is intended to analyze and estimate practical skills in searching, designation and firing on training means in all ranges of anti-tank missile complex «KORNET».

Key words: anti-tank missile complex «KORNET» operators training, 3D replicas, target designation and firing.

Druzhinin Andrei Lvovich, candidate of technical sciences, docent, engineer, jip61@rambler.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Zhabin Igor Petrovich, candidate of technical sciences, docent, head of a department, jip61@rambler.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»

УДК 371.686

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ СТРЕЛКОВО-ПУШЕЧНОГО ВООРУЖЕНИЯ

К.В. Куц, А.И. Жабин, В.С. Артюшков

Рассмотрены технологии, применяемые в управлении «Центр подготовки специалистов» (ЦПС)АО «КБП», при проведении практических занятий. Перечислены материалы, разработанные с помощью информационно-коммуникационных технологий (ИКТ), позволяющие повысить качество проведения практических занятий.

Ключевые слова: практические занятия, современные образовательные технологии, информационно-коммуникационные технологии.

Одной из задач, стоящих на сегодняшний день перед управлением ЦПС АО «КБП» является задача повышения качества подготовки специалистов по эксплуатации принятых на вооружение образцов вооружения и военной техники. Возможностей традиционных форм обучения при расширяющихся объемах и увеличивающейся сложности информации порой не достаточно для глубокого изучения материала и отработки практических навыков. В связи с этим в управлении ЦПС широко применяются современные образовательные технологии при проведении занятий, особенно практических, которые позволяют оптимально соединить теорию с практикой, эффективно использовать время учебного занятия и получить высокие качественные образовательные результаты.

Под технологией обучения понимается совокупность методов и средств обработки, изменения и представления учебной информации или, другими словами, это способы воздействия преподавателя на обучающихся в процессе обучения с использованием необходимых технических или информационных средств [1].

Наряду с применением современных образовательных технологий, таких как технология программированного обучения (разделение учебного материала на разделы, главы, параграфы, темы, учебные вопросы и виды учебных занятий, с указанием времени, отводимого на их изучение), технологией проблемного обучения (создание под руководством преподавателя проблемных ситуаций и активную самостоятельную деятельность обучаемых по их разрешению), технологией модульного обучения (рабочая программа учебной дисциплины разделена на модули – логически завершенные части учебного материала, обязательно сопровождаемые контролем знаний и умений обучающихся) и другими, в управлении ЦПС на занятиях в настоящее время широко используются ИКТ.

Под ИКТ будем понимать программно-аппаратные средства и устройства, функционирующие на базе микропроцессорной вычислительной техники, а также современных средств и систем информационного обмена, обеспечивающие операции по сбору, продуцированию, накоплению, хранению, обработке, передаче информации [2].

Внедрение ИКТ в учебный процесс позволило:

представить обучающие материалы не только в печатном виде, но и с использованием видеоряда, в графическом, звуковом виде, что дало обучающимся реальную возможность усвоить материал на более высоком уровне;

автоматизировать процесс усвоения, закрепления и применения учебного материала с учетом интерактивности электронных учебных пособий;

осуществить индивидуализацию обучения;

оперировать большим объемом информации;

адаптировать учебный материал к конкретным условиям обучения, потребностям и способностям обучающихся.

В управлении ЦПС по тематике эксплуатации стрелково-пушечного вооружения создано множество дидактических материалов ИКТ, например, по эксплуатации артиллерийского вооружения комплексов ПВО морского базирования, в виде учебных фильмов, учебных пособий, учебно-наглядных пособий, электронных учебных пособий и мультимедийных презентаций.

Основную часть практического занятия составляет практическая работа на учебном образце военной технике. Обучающиеся выполняют практические действия по техническому обслуживанию, используя руководства по эксплуатации, практические руководства и другие учебные пособия. В процессе занятия преподаватель, используя в том числе и технические средства обучения, показывает методы, способы и приемы выполнения действий, объясняет их последовательность, взаимосвязь, предостерегает от характерных ошибок.

Использование компьютерной графики, анимации, видео, звука, других медийных компонентов (рис. 1) делает изучаемый материал максимально наглядным, интересным, понятным и запоминаемым. Это особенно необходимо в тех случаях, когда обучаемый должен усвоить большое количество информации, содержащей инструкции, технологические карты и схемы, нормативные документы и др. Такая информация лучше запоминается, ее можно вывести на экран в любом масштабе, при этом не возникает никаких сложностей при возврате текста или другой информации назад для повторного объяснения, повторения или закрепления пройденного материала.



Рис. 1. Использование плазменной панели при проведении практических занятий в учебном ангаре ЦПС

Учебнаяточка по техническому обслуживанию образцов артиллерийского вооружения комплексов ПВО, оборудованная в учебном ангаре ЦПС, оснащена плазменной панелью Samsung ME55B на стойке для презентаций Allegri Techno-3-65, позволяющими использовать вышеперечисленные учебные материалы при проведении практических занятий посредством выведения иллюстративного материала на экран.

Кроме этого при проведении занятий широко используется программно-технический комплекс(ПТК) обучения LenovoMIIx320 (рис. 2), представляющий собой планшет с загруженными учебными материалами.



Рис. 2. Использование планшета во время обучения по порядку действий при техническом обслуживании образца вооружения

Комплекс ПТК, как правило, используется для изучения порядка действий перед проведением практических мероприятий по проведению технического обслуживания образца артиллерийского вооружения или закрепления уже отработанных практических действий в индивидуальном порядке.

Для определения эффективности использования средств ИКТ при проведении практических занятий был проведен подсчет с учетом статистических данных об успеваемости обучаемых. Так были взяты две группы по 15 обучаемых. Первая обучалась без применения средств ИКТ (группа А), а вторая – с использованием средств ИКТ (группа Б). По итогам обучения двух групп ими были выполнены задания, необходимые для выявления уровня полученных знаний. Показатель уровней оценивался по бальной системе (низкий (41 – 60), средний (61 – 80), высокий (81 – 100)). После чего был проведен сравнительный анализ всех полученных результатов, приведенный в гистограмме (рис 3).

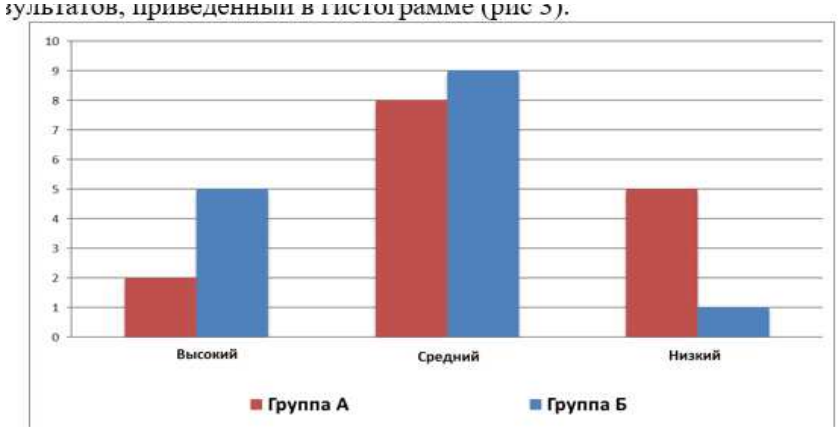


Рис. 3. Сравнительный анализ результатов проведенного эксперимента

Как видно из результатов анализа количество высоких и средних баллов в группе Б больше чем в группе А. Это доказывает, что познавательная деятельность у группы, обучавшейся с применением средств ИКТ выше, чем у группы, обучающейся без использования средств ИКТ.

Таким образом, можно прийти к выводу, что применение информационных технологий в процессе проведения практических занятий в управлении «ЦПС» позволило повысить качество подготовки специалистов, что доказывает проведенный анализ. Без использования этих технологий невозможно обеспечить качество профессиональной подготовки и переподготовки специалистов по эксплуатации комплексов ПВО.

Список литературы

1. Диденко С.Ю., Загоруйко Т.В., Лактионова Е.Е., Потапова С.В. Общее понятие о технологиях в обучении // Аспекты и тенденции педагогической науки: Материалы I Международной научной конференции. Санкт-Петербург: Свое издательство, 2016. С. 1 – 3.

2. Современные педагогические технологии для инженерно-технических работников, задействованных в преподавательской практике: учеб.-метод. пособие / под ред. Петровичева В.М., Журавлева С.Д. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 335 с.

Куц Константин Васильевич, ведущий инженер, costjan69@mail.ru, Россия, Тула, АО «КБП»,

Жабин Артем Игоревич, инженер, zhabinartem71@yandex.ru, Россия, Тула, АО «КБП»,

Артюшков Владимир Станиславович, инженер 1-й категории, v.art@yandex.ru, Россия, Тула, АО «КБП»

O UTILIZING THE CONTEMPORARY TEACHING TECHNICS FOR PRACTICAL TRAINING TO USE SMALL ARMS AND GUNNERY

K.V. Kuts, A.I. Zhabin, V.S. Artyushkov

Considered hereby are the technics utilized by "The Specialists Training Center" for the practical training. Listed are the materials developed with the information and communication technology, which are intended to enhance the practical training efficiency.

Key words: practical training, contemporary teaching technics, information and communication technolog.

Kuts Konstantin Vasilyevich, engineer, costjan69@mail.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»,

ZhabinArtemIgorevich, engineer, zhabinartem71@yandex.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Artyushkov Vladimir Stanislavovich, engineer, v.art@yandex.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»

УДК 371.64/.69

РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНЫХ УЧЕБНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ ВООРУЖЕНИЯ

В.А. Мальцев, Н. В. Майоров, А.Г. Колганов

Рассмотрено использование интерактивных учебных материалов при подготовке специалистов по эксплуатации комплексов вооружения. Описаны их виды, способы применения при проведении занятий и преимущества.

Ключевые слова: интерактивная доска, электронный симулятор, электронное учебное пособие, учебный фильм, 3D модель.

В настоящее время при подготовке специалистов различных Заказчиков по эксплуатации систем и комплексов вооружения в Центре подготовки специалистов АО «КБП» большое внимание уделяется применению интерактивных технологий. Использование интерактивных материалов и средств при проведении всех видов занятий позволяет в значительной мере повысить качество доводимого материала в ходе лекционных занятий и закрепить полученные знания в ходе практических занятий.

Главными преимуществами данных средств обучения является следующие:

возможность их применения на всех видах занятий;

возможность отображения информации на любом информационном средстве (от планшетного компьютера до интерактивной доски);

наглядность отображаемой информации;

использование симуляторов, повторяющих органы управления и индикацию информации реальных образцов;

экономия ресурса реальных образцов техники.

Кроме того, интерактивные материалы и средства в полной мере могут использоваться обучающимися в ходе самостоятельной работы и дистанционного обучения.

Что же такое интерактив? Интерактив – от английского слова interact: inter означает взаимный, слово act– действовать. То есть понятием «интерактивный» мы обозначаем способность к взаимодействию с чем-либо.

В ходе проведения всех видов занятий в Центре подготовки специалистов АО «КБП» широко применяются следующие интерактивные средства и материалы:

интерактивные доски;

электронные симуляторы;

электронные учебные пособия;

учебные фильмы;

3D модели.

Интерактивные доски. Интерактивные доски (рис. 1) являются средством отображения и работы с интерактивными материалами. Они позволяют, кроме непосредственно отображения информации, демонстрации графических и текстовых файлов и видео, осуществлять активную работу с интерактивными материалами.

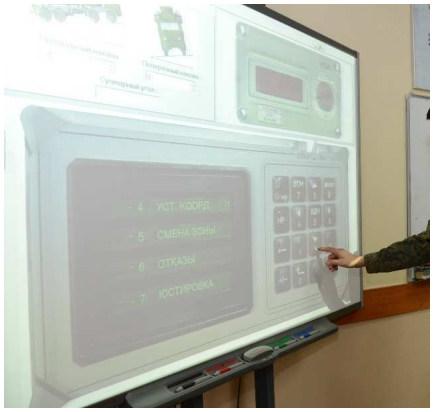


Рис. 1. Использование интерактивной доски при проведении практических занятий

Под активной работой с интерактивными материалами понимается возможность внесения необходимых пояснений и выделение особо важных фрагментов для повышения качества доводимого материала в ходе занятия, за счет программных и технических средств, входящих в состав досок (рис. 2). Такая доска подключается к компьютеру или ноутбуку. Для работы с интерактивными досками, в их состав, входит специальное программное обеспечение, с помощью которого преподаватель может добавлять пометки поверх любого изображения на экране, акцентировать внимание обучающихся на важных деталях.



Рис. 2. Выделение цветом наиболее важных деталей на интерактивной доске

Для наиболее полного использования всех возможностей интерактивных досок, учебно-методические материалы (такие как лекции, электронные симуляторы, электронные учебные пособия) подготавливаются особым образом.

Симуляторы и электронные учебных пособия. Одним из проблемных вопросов при проведении практических занятий на материальной части является невозможность одновременного привлечения большого количества обучающихся к выполнению практических действий, что приводит к снижению уровня подготовки отдельных обучающихся. Решение данного проблемного вопроса связано с применением в ходе практических занятий электронных учебных пособий и симуляторов.

Электронные учебные пособия (рис. 3) – это интерактивные средства, разработанные в специальных программных оболочках (например, SunRav), или в средах программирования (одной из которых является Qt), которые наполняются видеороликами, анимационными и графическими материалами для разъяснения доводимого материала. Электронные учебные пособия разрабатываются по наиболее сложным темам подготовки. Как правило они включают в себя сведения по устройству и эксплуатации наиболее сложных систем и образца в целом.

Разработка электронного пособия происходит следующим образом: прорабатывается структура пособия (либо электронное пособие создается на основе печатного), сбора информации на основе руководящих документов, подготавливается наглядная пояснительная иллюстрация, далее идет наполнение программной оболочки (или программного кода). Финальный этап разработки электронного пособия – проверка корректности данных, поиск ошибок и опечаток.

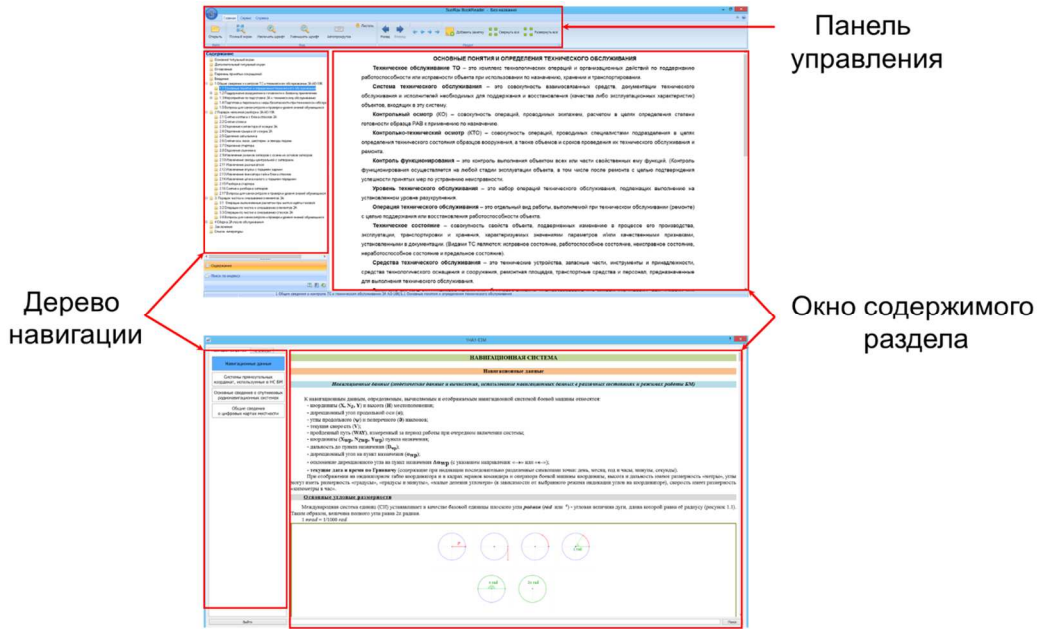


Рис. 3. Электронные учебные пособия, выполненные в программных оболочках SunRav, Qt

Электронные учебные пособия, в Центре подготовки АО КБП в основном используются при проведении практических занятий.

Симуляторы – это интерактивные средства, отображающие порядок управления работой систем образца вооружения. Для обучения специалистов по эксплуатации навигационных систем и средств связи используются симуляторы (рис. 4) навигационной системы, автоматизированного комплекса средств связи, и многие другие.

Главным преимуществом в использовании симуляторов по сравнению с образцами вооружения является не только одновременное задействование всех обучающихся в процессе усвоения материала, поскольку при проведении занятий на образце нет

возможности привлечь для работы более 2-3 человек, но и сбережение ресурса образца вооружения, снижение риска вывода из строя дорогостоящего оборудования в процессе обучения за счёт получения первоначальных навыков работы на симуляторе.

Разработка симулятора состоит из нескольких этапов и начинается с проработки структуры симулятора и графического интерфейса, сбора информации непосредственно о структуре технической системы, симулятор которой необходимо создать, далее идет написание кода всех составных частей и взаимодействие их друг с другом, а заканчивается сравнительной проверкой работы симулятора и настоящего образца вооружения.



Рис. 4. Работа с симуляторами на интерактивной доске

Для работы с электронными учебными пособиями и симуляторами, могут использоваться не только интерактивные доски, но планшетные компьютеры (рис. 5).

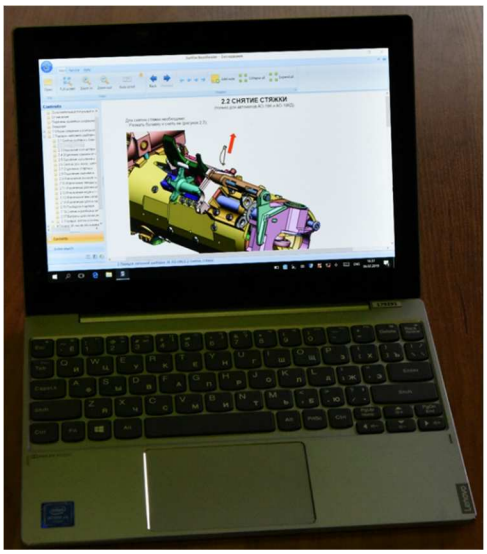


Рис. 5. Использование планшетных компьютеров с установленными интерактивными учебными материалами

При проведении занятий с использованием планшетных компьютеров учебная группа разбивается на подгруппы. Пока одна подгруппа занимается с преподавателем на материальной части, другая подгруппа закрепляет полученные знания после практической работы, либо готовятся к выполнению практических действий. Так же симуляторы и электронные учебные пособия могут использоваться обучающимися в ходе самостоятельной подготовки (рис. 6).



Рис. 6. Использование планшетных компьютеров на занятиях

Главным достоинством использования планшетных компьютеров по сравнению с интерактивными досками, является их компактность, мобильность и автономность работы.

Учебные фильмы и 3D модели. Учебные фильмы и 3D модели, как правило используются для изучения устройства образца вооружения и порядка выполнения операций при его подготовке к боевому применению, техническом обслуживании и ремонте (рис. 7). Отдельные части фильмов и 3D моделей применяются при создании презентаций, электронных учебных пособий и симуляторов.

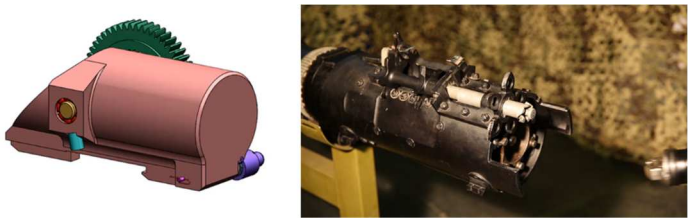


Рис. 7. Пример 3D модели и кадра из учебного фильма

Важной задачей преподавателя является подготовка модели к применению в учебном процессе, а именно: акцентирование внимания на деталях и сборочных единицах для повышения понимания устройства образца вооружения, реализация кинематических связей для создания трехмерной анимации. Доработанная 3D модель применяется при создании учебных пособий (как электронных, так и бумажных). Для пояснения наиболее сложных моментов трехмерная анимация применяется и при производстве учебных фильмов.

Применение интерактивных средств и учебных материалов позволило повысить качество подготовки специалистов различных Заказчиков. Оценка качества обученности специалистов (рис. 8), проводилась по следующим показателям:

– коэффициент усвоения знаний учебной группы – коэффициент k1;

– коэффициент качества обучения группы– коэффициент k2;

– и степень эффективности используемых технических средств обучения– коэффициент k3.

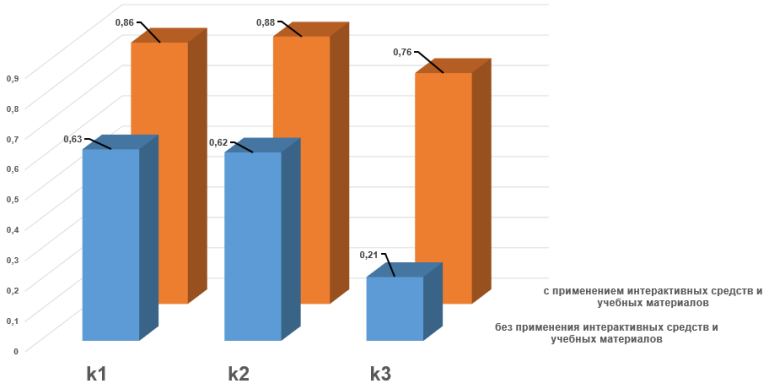


Рис. 8. Сравнительный анализ критериев обученности

Вывод. Проведенный анализ использование интерактивных средств в учебном процессе показал, что коэффициент усвоения знаний учебной группы и коэффициент качества обучения группы при проведении обучений с использованием интерактивных средств и учебных материалов примерно на 30% выше по сравнению с обучениями без них. А степень эффективности используемых технических средств выше на 70%.

Интерактивные средства и учебные материалы, используемые при подготовке специалистов по эксплуатации систем и комплексов вооружения в значительной мере, улучшают качество усвоения материала специалистами, проходящими обучение и способствуют более быстрой выработке практических навыков при эксплуатации образцов вооружения и военной техники.

Список литературы

1. Васильевич С.В. Роль новейших учебно-тренировочных комплексов в военной сфере // Сб. тез. докл. по материалам НПК «Современные тенденции развития военного образования». Минск: БГУ, 2015. С. 58 – 61.

2. Данильчук Е.В., Куликова Н.Ю. Интерактивные средства обучения как инструментарий современного педагога в формировании метапредметных образовательных результатов обучающихся // Известия Волгоградского педагогического университета. 2017. №8. С. 4-10.

3. Орлова Л.Н. Особенности разработки интерактивного электронного учебного пособия по системе электропитания комплексов высокоточного оружия. // Системы ВТО. Создание, применение и перспективы. Тула: Издание АО «Конструкторское бюро приборостроения им. академика А.Г. Шипунова»,2018. Вып. 1. С. 105-113.

4. Техническое обслуживание после стрельбы 30-мм зенитного автомата АО-18К и его модификаций: электронное учебное пособие / под ред. В.А. Мальцева. Тула: АО «КБП», 2020.

Мальцев Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, начальник управления, cps-kbp@mail.ru, Россия, Тула, АО «КБП»,

Майоров Николай Викторович, канд. техн. наук, начальник бюро, n.major28@mail.ru, Россия, Тула, АО «КБП»,

Колганов Александр Геннадьевич, инженер, ripamer@yandex.ru, Россия, Тула, АО «КБП»

USING THE INTERACTIVE TEACHING AIDS TO TRAIN THE SUITE OPERATORS

V.A. Maltcev, N.V. Mayorov, A.G. Kolganov

Considered hereby is the use of the interactive teaching aids to train the suite operators with the aids description, modes of operation and advantages for the teaching process.

Key words: interactive board, electronic simulator, electronic teaching aid, teaching video, 3D-model.

Maltcev Vladimir Alekseevich, doctor of technical sciences, professor, head of department, cps-kbp@mail.ru Russia, Tula, JSC «KBP»,

Mayorov Nikolay Viktorovich, candidate of technical sciences, n.major28@mail.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»,

Kolganov Alexandr Gennadievich, engineer, ripamer@yandex.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»

УДК 371.693

К ВОПРОСУ ТРЕНАЖЕРНОГО ОБУЧЕНИЯ РАБОТЕ СО СЪЕМНЫМ АВИАЦИОННЫМ ВООРУЖЕНИЕМ

А.В. Емельянов, В.Н. Гордеев, Д.А. Титов, И.П. Жабин

Представлен процедурный тренажер съемного авиационного вооружения. С учетом настоящего этапа развития данного проекта описаны его состав, принцип работы, выполняемые функции и дальнейшие перспективы совершенствования.

Ключевые слова: тренажер, подготовка летчиков.

В существующих реалиях одним из наиболее эффективных способов повышения качества подготовки летного и инженерно-технического состава является применение тренажерной подготовки. Данный вид подготовки постоянно развивается и совершенствуется, являясь отражением возможностей по снижению затрат, экономии времени и обеспечению безопасности в процессе обучения.

Тренажеры позволяют сформировать у обучаемого навыки действий моторно-рефлекторного и когнитивного типа в различных ситуациях, понять сущность протекающих процессов и их взаимную зависимость.

Развитие компьютерных технологий открыло широчайшие перспективы для разработки тренажеров, имитирующих боевое применение авиационного вооружения и обучающих работе с ним. Так уровень подготовки на современных тренажерах сопоставим, а зачастую и превышает эффективность подготовки на реальных образцах техники.

Применение тренажеров обусловлено следующими факторами:

достаточно высокой стоимостью и недостаточным количеством оборудования, которое может быть использовано для решения учебных задач;

затратами на эксплуатацию реального оборудования;

ограниченностью временного ресурса на подготовку оборудования к использованию;

большой сложностью изменения параметров оборудования и среды;

сложностью введения нового технологически усовершенствованного оборудования;

необходимостью выработки устойчивых практических навыков при работе с оборудованием, опасностью выполняемых работ.

Эффективное применение тренажеров в учебном процессе позволяет значительно уменьшить число ошибок, увеличить скорость манипуляции и принятия решений, сократить время обучения, более адекватно оценивать уровень полученных знаний и приобретённых навыков, индивидуализировать обучение, формировать выводы по действиям обучающегося.

Кроме того, авиационные тренажеры позволяют сэкономить значительные финансовые средства на подготовке летного и инженерно-технического состава в виду того, что стоимость эксплуатации реального летательного аппарата и комплекса авиационного вооружения кратно превосходит стоимость эксплуатации тренажера.

Решить проблемы повышения эффективности и оценки качества профессиональной подготовки авиационных специалистов можно при помощи применения инновационных специализированных тренажеров, использование которых значительно снизит количество ошибочных действий обучаемых в профессиональной деятельности.

Таким образом, актуальность данного направления обусловлена:

необходимостью повышения эффективности обучения с объективной оценкой качества профессиональной подготовки авиационных специалистов с целью снижения ошибочных действий обучаемых в профессиональной деятельности;

отсутствием специализированных тренажерных систем, предназначенных для подготовки летного и инженерно-технического состава применению съемного авиационного вооружения.

Российские производители авиационных тренажеров – АО ЦНТУ «Динамика», ГК «Транзас» и «Кронштадт», АО РАА «Спецтехника», «НИТА», «Авиационные тренажеры», «Модернизация авиационных комплексов». «Flight Studio Technology», Пензенское конструкторское бюро моделирования, НПФ «Системы комплексных тренажеров», ЗАО «Гефест и Т», «Курс-Симбирск», а также непосредственные разработчики и производители съемного авиационного пушечного вооружения АО Аэроэлектромаш (Московский агрегатный завод «Дзержинец»), «Дукс» («Коммунар»), «Монолит», «Заслон», «Государственное машиностроительное конструкторское бюро «Вымпел»«, «НПО «СПЛАВ», «Авиаагрегат» специализированных тренажерных систем, предназначенных для обучения летного и инженерно-технического состава применению и подготовке к полету данного типа авиационного вооружения не производят.

Причем подавляющее большинство существующих авиационных тренажеров дорогостоящие, не мобильные, что сразу исключает возможность их использования непосредственно в районах базирования авиационных частей.

Поэтому в рамках развития проекта [1-4] был усовершенствован процедурный тренажер для одного из образцов съемного авиационного пушечного вооружения (СППУ-22-01). В представленной на рис.1 комплектации тренажера в его состав входят: 1 – ноутбук с программным обеспечением; 2 – модель образца съемного авиационного вооружения (СППУ-22-01); 3 – модель балочного держателя БДЗ-25; 4 – фрагмент крыла летательного аппарата; 5 – металлическая стойка; 6 – имитатор ручки управления самолетом; 7 – имитатор оптического прицела с прицельной маркой; 8 – имитатор пристрелочной мишени; 9 – мониторы (телевизоры); 10 – трубка холодной пристрелки; 11 – комплект документации.



Рис. 1. Комплект тренажера

Комплект тренажера располагается в компактном, удобном для переноски ящике (рис. 2).



Рис. 2. Ящик для переноски тренажера

Тренажер позволяет осуществлять в аудиторных условиях теоретическую и начальную практическую подготовку, а также поддерживать и совершенствовать уровень профессиональных навыков инженерно-технического и летного состава эксплуатации съемного авиационного пушечного вооружения (на примере СППУ-22-01) по следующим вопросам:

– освоение интерьера кабины самолета, расположения и вида органов управления системы управления оружием;

– формирование навыков работы с органами управления и индикацией;

– практическое изучение последовательности действий при проверке системы управления оружием самолета и съемного авиационного пушечного вооружения;

– практическое обучение проведению подготовки к полету, производимых в кабине самолета и за ее пределами;

– отработка летным составом последовательности управляющих действий при выполнении упражнений летной подготовки по применению съемного авиационного пушечного вооружения;

– обучение, поддержание и совершенствование уровня профессиональной подготовки по эксплуатации съемного авиационного пушечного вооружения.

Учитывая, что в местах дислокации и ведения боевых действий имеется ограниченное количество, а чаще всего вообще отсутствует техническая литература, то для устранения это недостатка в начале обучения представляется 3D-фильм, демонстрирующий внешний вид изучаемого образца вооружения, его устройство, тактико-технические характеристики, принцип действия, а также боевое применение образца съемного вооружения. Для разработки 3D-модели изучаемого образца вооружения была выбрана программа Cinema 4D (рис. 3).

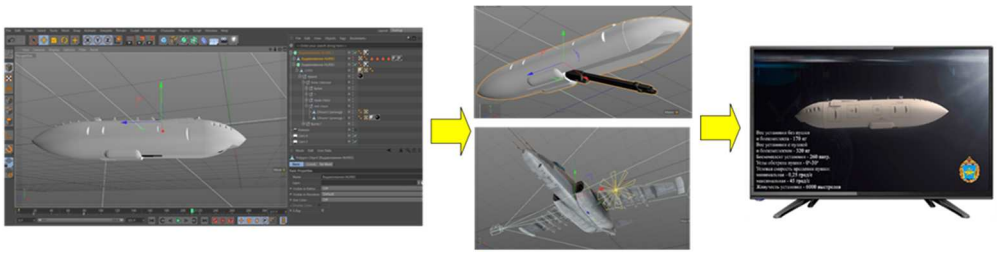


Рис. 3. Фрагмент разработки и демонстрации 3D-фильма

Программное обеспечение тренажера было разработано в среде Visual Studio на языке программирования C#. В нем заложены последовательности действий летного и инженерно-технического состава в соответствии с технологическими картами и алгоритмами боевого применения изучаемого образца вооружения.

Программное обеспечение тренажера позволяет:

– моделировать боевую обстановку, задавая различные варианты применения съемного авиационного вооружения;

– проводить тестовую проверку всех систем тренажера;

– имитировать работу аппаратуры системы управления оружия самолета и контрольно-измерительных приборов.

Диалоговое окно программы представляет собой анимированную кабину пилота и размещенное за ее пределами оборудование (рис. 4).

Для улучшения визуализации и качества обучения были анимированы контрольно-измерительные приборы, отвечающие за работу авиационного вооружения, а также ручка управления самолета, что позволило наглядно имитировать их работу и проводить тестовую проверку всех систем тренажера.

Обучаемый, в соответствии с боевой задачей (то есть типом цели, ее протяженностью, высотой применения и др.), заданием преподавателя или с технологической картой выполняет необходимые операции на выбранном им анимированном изображении соответствующего блока.

Все управляющие сигналы подаются на макет изучаемого образца съемного вооружения, что улучшает визуализацию обучения.

Кроме того, усовершенствованный имитатор оптического прицела позволяет визуализировать процесс захвата цели, стрельбы по ней, а в совокупности с трубкой холодной пристрелки, включенной в комплект тренажера и лазерными излучателями, демонстрировать принципы холодной пристрелки (рис. 5).



Рис. 4. Диалоговое окно программного обеспечения с пультами и панелями системы управления вооружением, проверочных и тестовых систем

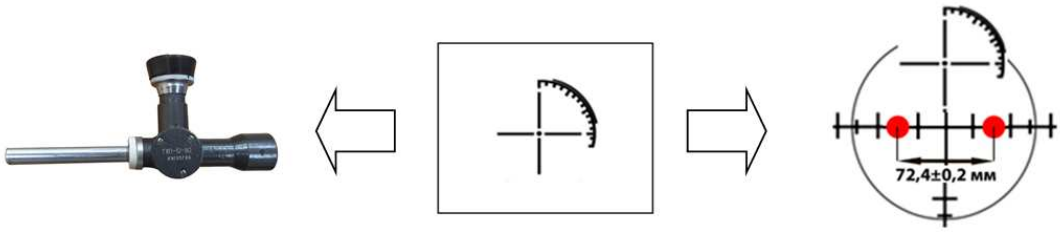


Рис. 5. Процесс визуализации измерения расстояния между осями каналов стволов и холодной пристрелки на пристрелочной мишени

По окончанию выполнения тестового задания формируется база данных о результатах его прохождения с указанием индивидуальных данных обучаемого, номера группы, работного времени, количества и типа допущенных ошибок, полученной оценки, что позволяет преподавателю правильно скорректировать процесс обучения.

Направления развития тренажера и его использования представлены на рис. 6, 7.



Рис. 6. Направления использования тренажера



Рис. 7. Перспективы развития тренажера

Опытная эксплуатация показала, что разработанный тренажер:

повышает эффективность боевого применения авиационного вооружения в 1,24 раза, а также качество обучения специалистов на 35% с объективной оценкой качества их профессиональной подготовки;

имеет высокую мобильность (15 минут на развертывание) и степень визуализации, небольшие массу (20 кг в переносном ящике) и габариты (размеры рабочего места – 1,0×0,7×0,6 м);

сокращает время подготовки специалистов одной учебной группы почти в 1,9 раза;

повышает уровень безопасности обучения;

уменьшает численность преподавательского и инженерно-технического состава в 2,5 раза;

существенно сокращает использование вооружения, военной и специальной техники;

повышает заинтересованность курсантов в обучении;

имеется возможность расширения номенклатуры съемного авиационного вооружения, а также типов летательных аппаратов, используемых для обучения.

Кроме того, заказчик на основе разработанных авторами технических решений может самостоятельно изготовить подобный тренажер.

Авторами продолжается дальнейшее развитие проекта.

Список литературы

1. Емельянов А.В., Гордеев В.Н., Жабин И.П. Разработка процедурного тренажера съемной подвижной пушечной установки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2019. Вып. 4. С. 110-116.

2. Авиационный тренажер: пат. на изобр. 2693426 РФ, МПК G09B 9/08 / Емельянов А.В., Гордеев В.Н., Вытришко Ф.М. Заявка №2018129393 от 10.08.2018. Опубл. 02.07.2019. Бюл. № 19. 9 с.

3. Комплект приборов для обучения работе со съемным авиационным вооружением: пат. на пром. образец 121148 РФ, МКПО 19-07;22-01;22-04 / Емельянов А.В., Гордеев В.Н., Вытришко Ф.М. и др. Хаявка №2018505788 от 25.12.2018. Оопубл. 18.08.2020. Бюл. № 9. 4 с.

4. Тренажер СППУ-22-01: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018661739 от 14.09.2019 / Емельянов А.В., Белозерский М.С., Андрейцев Д.А. Заявка № 2018616485 от 19.06.2018.

Емельянов Алексей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, alex-77-71@mail.ru, Россия, Воронеж, ВВА им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,

Гордеев Василий Николаевич, канд. техн. наук, доцент, gordeefff@inbox.ru, Россия, Воронеж, ВВА им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,

Титов Дмитрий Дмитрий Александрович, курсант, dima99t@gmail.com, Россия, Воронеж, ВВА им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,

Жабин Игорь Петрович, канд. техн. наук, доцент, начальник отдела, jip61@rambler.ru, Россия, Тула, АО «КБП»

PERSONNEL TRAINING OF DETACHABLE AVIATION ARMAMENT APPLICATION

A.V. Emelyanov, V.N. Gordeev, D.A. Titov, I.P. Zhabin

The developed СППУ-22-01 detachable mobile gun-based mount simulator is presented and given description of its composition, operation principle and functions provided. The simulator provides training on flight preparation of engineers and technicians as well as training of pilots on application of a type of Су-25 detachable armament in classroom conditions.

Key words: simulator, pilots training.

Emelyanov Alexey Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, alex-77-71@mail.ru, Russia, Voroneg, MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A.Gagarin Air Force Academy»,

Gordeev Vasyly Nikolaevich, candidate of technical sciences, lecturer, gordeefff@inbox.ru, Russia, Voroneg, MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A.Gagarin Air Force Academy»,

Titov Dmitriy Aleksandrovich, cadet, dima99t@gmail.com, Russia, Voroneg, MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A.Gagarin Air Force Academy»,

Zhabin Igor Petrovich, candidate of technical sciences, docent, head of a department, jip61@rambler.ru, Russia, Tula, JSC «KBP»

СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ

УДК 006.057.2; 621.774

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПА КОМПЛЕКСНОЙ СТАНДАРТИЗАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗАИМОУВЯЗАННЫХ ТРЕБОВАНИЙ К ОБЪЕКТУ СТАНДАРТИЗАЦИИ

М.А. Полякова, Т.В. Казанцева, Н.К. Казанцева, Г.А. Ткачук

Стандарты являются одним из важнейших инфраструктурных элементов экономики. С помощью комплексной стандартизации обеспечивается взаимосвязь между всеми факторами, определяющими качество и безопасность продукции. На примере конкретного стандарта рассмотрено «дерево ссылок» первого и второго уровня и продемонстрирована необходимость и сложность обновления требований обеспечивающих систематизацию, оптимизацию и увязку всех взаимодействующих факторов, влияющих на конкретный объект стандартизации и обеспечивающих экономически оптимальный уровень качества объекта.

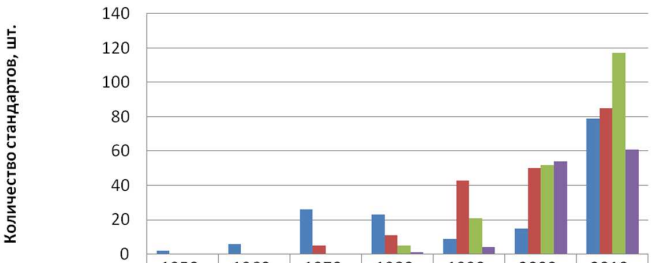
Ключевые слова: комплексная стандартизация, стандарт, взаимосвязь требований, согласование требований, нормативные ссылки.

В современных условиях становления цифровой экономики эффективное расширение рынков и эволюция отраслей возможны только при наличии развитых платформ, технологий, институциональной и инфраструктурной сред [1-3]. Цифровая экономика основывается на создании глобальных информационных систем, которые предназначены для хранения, поиска и обработки информации самого разного вида, поэтому вся полезная информация должна соответствовать новым условиям обращения.

В настоящее время национальная база стандартов РФ содержит около 37000 стандартов и представляет собой ценнейшую информацию, которая отобрана и проверена временем, усовершенствована и обобщена [4, 5]. Стандарты выполняют экономическую, информационную, социальную, коммуникативную, ресурсосберегающую и ряд других функций и поэтому являются одним из важнейших инфраструктурных элементов экономики. Построение и развитие цифровой экономики возможно только на базе развивающейся и совершенствующейся базы стандартов, при этом форма и содержание стандартов должны быть удобны для цифрового формата обращения. Для оценки готовности работать в новых условиях возникает потребность оценить информацию, содержащуюся в стандартах, и возможность быстрого и согласованного внесения изменений по всему комплексу требований.

В настоящее время важнейшим показателем работы в области стандартизации становятся сроки принятия новых стандартов и сроки действия нормативных документов. Масштабы необходимой работы в области стандартизации по данному критерию можно оценить на примере динамики принятия стандартов на трубную продукцию, действующих в России, а также известных и применяемых в России международных стандартов ИСО и национальных стандартов таких стран как Германия и Китай [6].

На рис.1 представлено количество действующих и применяемых в России стандартов на трубную продукцию по дате их принятия.



	1950-1959	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2019
Россия - 160	2	6	26	23	9	15	79
ИСО - 194			5	11	43	50	85
Германия -195				5	21	52	117
Китай - 120				1	4	54	61

Рис. 1. Количество применяемых в России стандартов на трубную продукцию в зависимости от временного интервала принятия

Для всех рассматриваемых уровней принятия стандартов очевидно, что количество новых стандартов преобладает, и база стандартов значительно обновлена. В России за период с 2010 г. по 2019 г. принято 79 новых стандартов из 160 действующих, и, таким образом, база национальных и межгосударственных стандартов обновлена примерно на 50 %. В международной организации по стандартизации за этот же период принято 85 стандартов для различных аспектов трубной продукции, и степень обновления составляет около 44%. Наибольшее количество стандартов на трубную продукцию в 2010-2019 гг. было принято в Германии - 117 стандартов, которые можно найти в российской базе «Техэксперт», в данном случае степень обновления можно оценить на уровне 60%. По сведениям, приведенным в базе «Техэксперт», в России известны и применяются 120 китайских стандартов на трубную продукцию, причем 61 стандарт из 120 был принят за период 2010-2019 гг., степень обновления данной группы стандартов можно оценить также на уровне 50%.

Стандарты устанавливают и обеспечивают технически достижимый уровень безопасности, качества и конкурентоспособности продукции. Для этой цели применяется специальный метод стандартизации – комплексная стандартизация. Это метод, при котором осуществляется целенаправленное и планомерное установление и применение системы взаимоувязанных требований к самому объекту комплексной стандартизации как в целом так и к его основным элементам, в том числе к материальным и нематериальным факторам, влияющим на исследуемый объект [7]. Сущность комплексной стандартизации сводится к систематизации, оптимизации и увязке всех взаимодействующих факторов, влияющих на конкретный объект стандартизации и обеспечивающих экономически оптимальный уровень качества. Элементы для формирования взаимоувязанных требований к объекту можно разделить на три направления: состав объекта, изготовление объекта и контроль качества объекта (рис. 2).

Основные факторы объекта стандартизации: состав объекта, изготовление и контроль объекта в свою очередь формируют следующие более конкретные группы факторов, определяющие качество объекта: сырье и материалы, комплектующие узлы и детали, технология производства, оборудование, инструмент и приспособления, средства измерений и методы испытаний.

Для обеспечения высокого качества трубной продукции, как и любой другой, необходима взаимная согласованность требований по всем перечисленным направлениям и группам факторов. Данная согласованность помимо установления прямых норм непосредственно в стандарте обеспечивается через нормативные ссылки, указываемые в рассматриваемом стандарте на продукцию [8]. Таким образом, комплексная

стандартизация обеспечивает формирование согласованных требований, как на стадии проектирования, так и на стадии производства, хранения, транспортирования, реализации и эксплуатации [9-11].



Рис. 2. Принципиальная схема формирования взаимоувязанных требований к объекту стандартизации

Рассмотрим действующие в России национальные и межгосударственные стандарты на трубную продукцию. Данные, представленные на рис. 1, демонстрируют быстрый рост количества новых стандартов, что свидетельствует о глубоких изменениях технологий, оборудования, используемых материалов и показателей качества трубной продукции. С другой стороны, обеспечивая принцип комплексной стандартизации, все новые стандарты, принятые в 2010-2019 гг., обязательно имеют ссылки на ранее принятые стандарты. Так, например, межгосударственный стандарт ГОСТ 31447-2012 «Трубы стальные сварные для магистральных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. Технические условия» подготовлен на основе национального стандарта Российской Федерации ГОСТ Р 52079-2003 и вступил в действие 1 января 2015 г. В новом стандарте имеются нормативные ссылки на 60 других стандартов, регламентирующих факторы, определяющие качество конечной продукции. При этом первоначально новый стандарт, принятый в 2012 г. и вступивший в силу в 2015 г., содержит ссылки, а, следовательно, содержит требования принятые значительно раньше, начиная с 1975 г. [12-14].

Аналогично выстраивается картина ссылок в международных стандартах. Рассмотрим основные направления взаимоувязывания требований стандартов на трубную продукцию на примере стандарта, принятого впервые в ноябре 2013 г. ГОСТ 32528-2013 «Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Технические условия», который введен в действие 01.01.2016 г. Стандарт распространяется на горячедеформированные бесшовные трубы общего назначения из углеродистой и легированной стали для трубопроводов, конструкций, деталей машин и других технических целей.

В стандарте приведены ссылки на 56 стандартов, касающиеся вопросов метрологии и измерений, а также металлургии. «Дерево ссылок», которое формирует взаимоувязанные требования для ГОСТ 32528-2013, представлено на рис. 3. В соответствии с общероссийским классификатором стандартов (ОКС), который представляет собой полный аутентичный текст международного классификатора стандартов ИСО/ИНФКО МКС, ссылки были направлены в следующие разделы классификатора:

раздел 17 – Метрология и измерения. Физические явления – 4 стандарта;

раздел 23 – Гидравлические и пневматические системы и компоненты общего назначения – 7 стандартов;

раздел 77 – Металлургия – 45 стандартов.

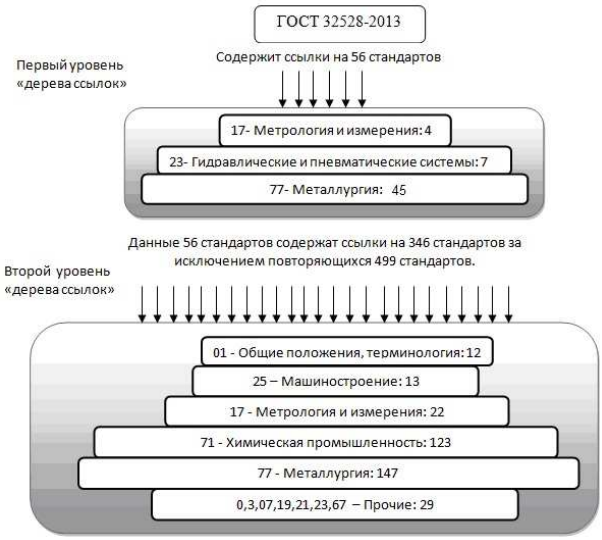


Рис. 3. Принципиальная схема формирования «дерева ссылок» в ГОСТ 32528-2013. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Технические условия

Основные ссылки в ГОСТ 32528-2013 адресованы в следующие группы: черные металлы, испытания металлов и линейные и угловые измерения.

На втором уровне «дерева ссылок», обеспечивающих комплексную стандартизацию, даны ссылки уже на 845 стандартов. После исключения повторяющихся стандартов остается 346 стандартов, которые относятся к различным разделам ОКС: металлургия, химическая промышленность, метрология и измерения и другие. На рис. 4 показано распределение ссылок по разделам ОКС для первого и второго уровня «дерева ссылок» в процентном отношении.



Рис. 4. Распределение в процентном отношении количества ссылок на первом и втором уровнях «дерева ссылок» по разделам ОКС в ГОСТ 32528-2013. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Технические условия

По данной диаграмме можно констатировать, что для стандартов на трубную продукцию наиболее важными параметрами, формирующими показатели качества трубной продукции, являются сведения, представленные в разделах: металлургия, химическая промышленность, метрология и измерения.

Далее рассмотрим, каким образом нормативные ссылки распределяются по временным интервалам их принятия. Количество стандартов, приведенных в разделе «Нормативные ссылки» ГОСТ 32528-2013, по срокам их принятия приведено на рис. 5.

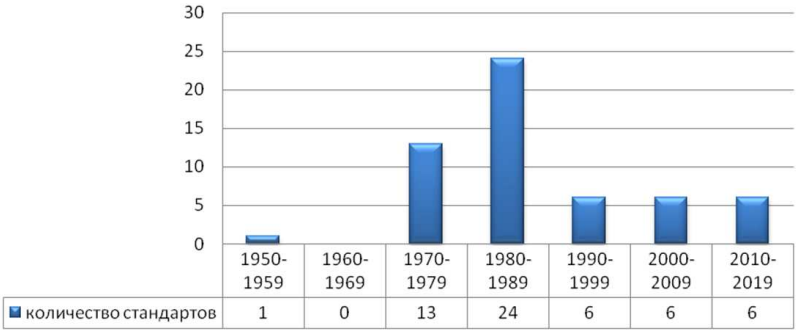


Рис. 5. Распределение по срокам принятия стандартов, приведенных в разделе «Нормативные ссылки» ГОСТ 32528-2013. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Технические условия, на первом уровне «дерева ссылок»

Наибольшее количество ссылок адресовано в стандарты, принятые в 1980-1989 гг., далее располагается интервал 1970-1979 гг. и только затем ссылки адресованы в стандарты, принятые после 2000 г.

На втором уровне «дерева ссылок» рассматриваемые 56 стандартов, которые в свою очередь имеют ссылки на 845 стандартов. После исключения повторов остается 346 стандартов, на которые содержатся ссылки. Распределение по дате принятия данных 346 стандартов приведено на рис. 6.

Диаграммы, приведенные на рис. 5 и 6, демонстрируют обращение новых стандартов через нормативные ссылки к стандартам, принятым в основном 40-50 лет назад. Причем основная масса ссылок на втором уровне «дерева ссылок» сдвигается еще назад в прошлое на 10 лет: основное количество ссылок адресована в стандарты, принятые в 1970-1979 гг., затем идут стандарты, принятые в 1980-1989 гг. и в 1990-1999 гг., и только затем идет обращение в стандарты, принятые после 2000 г.

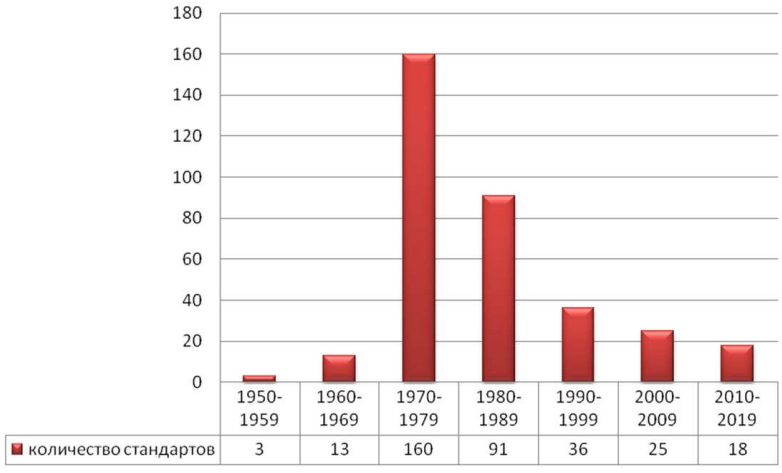


Рис. 6. Распределение по срокам принятия стандартов, приведенных в разделе «Нормативные ссылки» ГОСТ 32528-2013. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Технические условия, на втором уровне «дерева ссылок»

Таким образом, при разработке стандартов как национальных, региональных, так и международных имеет место достаточно сложная ситуация, когда новые стандарты последнего десятилетия обращаются к сведениям, установленным в основном 50 лет назад. Отменить эти связи невозможно, не разрушив всю систему стандартизации, следовательно, необходимо создавать специальные связи между стандартами 1, 2, n-го и последующих уровней «дерева ссылок» через новые возможности современных цифровых технологий.

На сегодняшний день связи между стандартами исключительно последовательные и вертикальные, в результате чего возникает дублирование документов с целью сохранения всех связанных требований. Жесткость и одномерность данной системы обеспечивают высокую достоверность информации и эффективно работают при незначительных изменениях, одновременно происходящих в нормативных документах. Однако, в условиях введения новых, в том числе и цифровых технологий, когда обязательным условием управления является снижение времени отклика на изменения параметров в рамках действующих и будущих систем принятия решений, необходимо обеспечить быстродействие системы наряду с обеспечением достоверности информации и взаимоувязывания требований.

Выводы. Взаимоувязывание и согласование требований к качеству и безопасности продукции обеспечивается за счет комплексной стандартизации.

На примере действующего стандарта требований к трубной продукции, ГОСТ 32528-2013 «Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Технические условия» прослежен механизм комплесной стандартизации через формирование «дерева ссылок» первого и второго уровня.

Распределение нормативных ссылок на первом и втором уровнях «дерева ссылок» демонстрируют, что при разработке нового стандарта имеет место обращение к стандартам принятым в основном 40-50 лет назад. Причем основная масса ссылок на втором уровне «дерева ссылок» сдвигается еще на 10 лет назад. Таким образом, новые стандарты последнего десятилетия обращаются к сведениям, установленным 40-50 лет назад, что может тормозить формирование требований к качеству продукции через применение средств измерений, методов испытаний и контроля и используемого сырья.

Для обеспечения взаимоувязанных требований при введении нового стандарта необходимо комплексно обновлять требования, обеспечивающие систематизацию, оптимизацию и увязку всех взаимодействующих факторов, влияющих на конкретный объект стандартизации и обеспечивающих экономически оптимальный уровень качества объекта. Необходимо создание специальных связей между стандартами 1, 2 и n-го уровней «дерева ссылок» через новые возможности современных информационных технологий.

Список литературы

1. Liao Y., Deschamps S., Loures E.F.R., Ramos L.F.P. Past, present and future of Industry 4.0 -a systematic literature review and research agenda proposal // International Journal of Production Research. 2017. Vol. 55. N. 12. P. 3609-3629

2. Шнепс-Шнеппе М.А., Селезнев С.П., Наомит Д.У., Куприяновский В.П. О кибербезопасности критической инфраструктуры государства // International Journal of Open Information Technologies. 2016. Vol. 4. N. 7. P. 17-31.

3. Куприяновский В.П., Синяго С.А., Добрынин А.П. BIM-Цифровая экономика. Как достигли успеха? Практический подход к теоретической концепции. Часть 1. Подходы и основные преимущества // International Journal of Open Information Technologies. 2016. Vol. 4. № 3. P. 1-8.

4. Зажигалкин А.В. Стандартизация: методология и практика. М.: РИА «Стандарты и качество», 2017. 89 с.

5. Белобрагин В.Я., Зажигалкин А.В., Зворыкина Т.И. Основы стандартизации. М.: РИА «Стандарты и качество», 2017. 516 с.

6. Казанцева Н.К., Ткачук Г.А., Казанцева Т.В. Что необходимо изменить в системе управления стандартами // Стандарты и качество. 2020. № 6. С. 14-18.

7. Стандартизация и управление качеством продукции / В.П.Швандар, В.П. Панов, Е.М. Купряков и др.; под ред. В.П. Швандера. М.: ЮНИТИ ДАНА, 2001. 487 с.

8. Дрягун Э.П., Полякова М.А., Белан О.А., Алсынбаев Н.Т. К вопросу о проблемах использования ссылочных стандартов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 10. С. 1169-1180.

9. Брод Б.Ю., Бунин С.Р. Формирование методологии стандартизации, как науки // Стандарты и качество. 2012. № 2. С.56-58.

10. Survey of Block Chain Technology for Digitization in India / S. Prasanna, N. Manikandan, K. Vijayakumar, K. Anusha // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. № 6. P. 750 – 756.

11. Kotarba M. Measuring digitalization Key Metrics // Foundations of Management. 2017. Vol. 9. P. 123-138

12. The Problems of Standards Clssification / N.K. Kazantseva, G.A. Tkachuk, A.L. Nevolina, V.S. Shavrin // International Journal of Management. 2020. Vol. 11. № 3. P. 36–42.

13. Зажигалкин А., Пугачев В., Петросян А. Цифровая экономика и будущее стандартизации // Стандарты и качество. 2017. № 9. С.30-34.

14. Зажигалкин А., Пугачев В., Петросян А. Цифровая экономика и будущее стандартизации // Стандарты и качество. 2017. № 10. С.23-27.

Полякова Марина Андреевна, д-р техн. наук, профессор, m.polyakova@magtu.ru, Россия, Магнитогорск, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,

Казанцева Татьяна Владимировна, ассистент, t.v.kazantseva@urfu.ru, Россия, Екатеринбург, Уральский федеральный университет,

Казанцева Надежда Константиновна, канд. техн. наук, доцент, n.k.kazantceva@urfu.ru, Россия, Екатеринбург, Уральский федеральный университет,

Ткачук Галина Андреевна, старший преподаватель, g.a.tkachuk@urfu.ru, Россия, Екатеринбург, Уральский федеральный университет

APPLICATION OF THE PRINCIPLE OF COMPLEX STANDARDIZATION TO DETERMINE THE INTERCONNECTED DEMANDS TO THE OBJECT OF STANDARDIZATION

M.A. Polyakova, T.V. Kazantseva, N.K. Kazantseva, G.A. Tkachuk

Standards are one of the most important infrastructural elements of the economy. Through coplex standardization, the relationship between all factors that determine the quality and safety of products is ensured. On the example of a specific standard, the "tree of references" of the first and second levels is considered and the necessity and complexity of updating the requirements that ensure the systematization, optimization and coordination of all interacting factors that affect a specific object of standardization and provide an economically optimal level of object quality are demonstrated.

Key words: complex standardization, standard, requirements interrelation, requirements harmonization, normative references.

Marina Andreevna Polyakova, doctor of technical sciences, professor, m.polyakova@magtu.ru, Russia, Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University,

Tatiana Vladimirovna Kazantseva, assistant, t.v.kazantseva@urfu.ru, Russia, Ekaterinburg, Ural Federal University,

Kazantseva Nadezhda Konstantinovna, candidate of technical sciences, docent, n.k.kazantceva@urfu.ru, Russia, Ekaterinburg, Ural Federal University,

Tkachuk Galina Andreevna, senior lecturer, g.a.tkachuk@urfu.ru, Russia, Ekaterinburg, Ural Federal University

МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ПРОЦЕССЫ

УДК 655.2; 655.326.1

ДОПЕЧАТНАЯ ПОДГОТОВКА ВО ФЛЕКСОГРАФИИ

О.В. Соколова

Рассматриваются сложности, возникающие при флексографской печати и способы их устранения на этапе допечатной подготовки. Описывается специфика допечатной подготовки векторных и растровых элементов изображения, работа с точностью воспроизведения цветов и переходов.

Ключевые слова: флексография, допечатная подготовка, векторная графика, растровая графика, воспроизведение, цвет.

Процесс цифровизации с каждым днем все глубже внедряется в современную жизнь, работу предприятий и организаций. Не стала исключением и полиграфическая отрасль, к примеру, с развитием компьютерных технологий практически все допечатные процессы стали выполняться в цифровом виде. Но специфика проведения допечатной подготовки макетов различается в зависимости от способа печати, для которого она предназначена.

Рассмотрим подробнее особенности допечатных работ во флексографии.

Сложность стабильности флексографской печати заключается в ее работе с гибкими печатными формами, неравномерностью запечатываемой поверхности и спецификой флексографских красок с низкой вязкостью.

В процессе печати гибкая печатная форма в зоне контакта с запечатываемой поверхностью вдавливается в нее, что приводит к растеканию низковязких красок и соответственно визуально утолщает наносимое изображение, рис. 1.

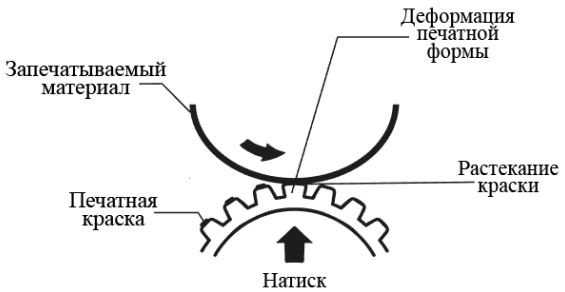


Рис. 1. Растекание краски при контакте печатной формы и запечатываемого материала

Для того чтобы результат соответствовал ожиданиям, на этапе допечатной подготовки при разработке макета учитываются все особенности печатного процесса, используемого материала и красок, и вносятся соответствующие корректировки.

Качество печатной продукции определяется тремя основными характеристиками: воспроизведением мельчайших деталей, цветовоспроизведением, тоновоспроизведением.

Для каждого их этих параметров существуют свои требования и условия, соблюдение которых будет способствовать получению качественной работы. Рассмотрим подробнее особенности допечатной флексографской подготовки.

Работа со шрифтами. Свойство флексографских красок растекаться при печати влияет на качество воспроизведения мелких шрифтов или их мельчайших деталей. Нечеткость воспроизведения также может быть связана со спецификой шрифта, например, если его гарнитура включает большое количество засечек, обеспечивающих большую выразительность (рис. 2).



Рис.2. Шрифт с засечками

В связи с этим рекомендуется по возможности избегать сложных шрифтов с мелкими деталями, а также обращать внимание на узкие просветы между знаками, так как межбуквенные просветы могут раздавливаться при печати.

Треппинг. Независимо от того, растровые или векторные изображения используются в работе, необходимым условием для получения качественной печати является выполнение треппинга. То есть наложения друг на друга двух красок при их стыке в изображении. Пример внешнего треппинга представлен на рис. 3.

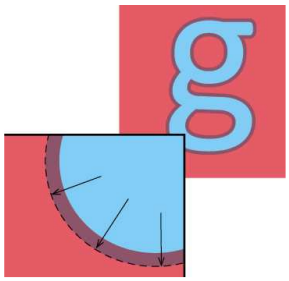


Рис. 3. Внешний треппинг

Выбор цветового пространства. При воспроизведении в электронном виде оригиналов используются сканеры – устройства, анализирующие в цветовом отношении двухмерные изображения, разделяя их на мельчайшие элементы (пиксели).

В процессе работы сканер измеряет количество света, отраженного от пикселей при помощи трех фотосенсоров: красного, зеленого и синего. Изображение, переведенное в цифровой вид, как правило, отображается в цветовой модели RGB. Для получения более достоверной цветопередачи при печати, цветной объект рекомендуется преобразовать в CMYK, чтобы точнее рассчитались необходимые в четырехкрасочной печати цвета: голубой, пурпурный, желтый и черный.

При работе с объектами, имеющими заливку, надо следить, чтобы оттенок границ заливки и самой заливки не отличался.

Расположение важных составляющих макета не должно находиться близко к линиям разреза или высечки.

Допуски и приводки. Расчет допуска для линий вычески берется исходя из материала, используемого при печати – чем плотнее материал, тем больше будет величина допуска. Рекомендуемые размеры указываются в спецификации.

При печати двух стоящих рядом слов разными цветами требуется отдалить их друг от друга на расстояние, превышающее двойное значение треппинга. Такие приемы позволят избежать наложения слоев и искажения выравнивания [1].

Работа с текстом. Правильное позиционирование текста обеспечивается благодаря использованию табуляции вместо пробелов. В этом случае при изменении шрифта стабильность позиционирования не исказится.

Используемые шрифты рекомендуется преобразовывать в кривые, чтобы показатель разрешения не менялся независимо от программ обработки, используемых в дальнейшей работе, а также на случай не распознавания определенного шрифта той или иной программой, или непосредственно устройством вывода.

Использование специальных цветов. При работе с файлом, в котором используются специальные цвета, образующие новый цветовой оттенок при наложении друг на друга, создают два файла: закомпонованный и с двумя отдельными слоями. В этом случае цветопробы должны сопровождаться инструкциями, описывающими создание нового оттенка с указанием количественного соотношения красок, создающих его.

Баланс по серому. Этот параметр представляет из себя характеристику оттенка краски, толщину ее красочной пленки, размер точки и находится под влиянием очередности цветов, треппинга краски, растискивания и непосредственных характеристик печатной машины. Так как в реальности краски не являются идеальными светофильтрами, при попытке создать баланс по серому, использовав смесь одинакового размера точек пурпурного, желтого и голубого цветов, в итоге получится бурый.

Для создания серого следует уменьшать размер точек желтого и пурпурного оттенка относительно точек голубого. Процент уменьшения будет зависеть от чистоты цветов.

Построение переходов цвета. Минимальный размер точки перехода цвета в областях высоких светов не должен быть меньше, чем минимально допустимое значение секции печати и не должен быть больше ее максимально допустимого значения для области теней [3].

Переход одного специального цвета в другой. Для создания перехода одного специального цвета в другой специальный цвет, требуется создать два отдельных файла: закомпонованный и производственный с двумя отдельными переходами. В этом случаем в специальной аннотации слоя делается отметка на пробе о том, каким образом создается данный переход: процентное соотношение цветов, накладываемых друг на друга. Альтернативным вариантом может стать замена специальных цветов на основные [1].

Для создания перехода специального цвета к белому нужно указать минимальный процент точек специального цвета на светлом конце перехода.

Много сложностей возникает с треппингом переходов цвета. Чаще всего при этом темный цвет печатается сверху светлого, но при работе с переходами цвета эта последовательность меняется.

Если размещать текст или графику поверх цветового перехода и использовать при этом обычный треппинг, могут возникнуть нежелательные последствия.

Еще одной проблемой с переходами является их растрирование. Иллюстрации, содержащие большое количество переходов, значительно снижают скорость обработки. Поэтому при работе с макетом лучше совмещать растровую и векторную графику. Векторная графика лучше подходит при работе со шрифтами и элементами, требующими четкой проработки деталей, а растровая для работы с цветом и его переходами.

Оптическая плотность плашек. Качество и точность воспроизведения цветов определяются при помощи измерения их оптической плотности денситометром.

На высохших цветовых пробах значение отклонений оптической плотности должны попадать в интервал ±0,007 для плашек пурпурного, голубого и черного цвета, и в интервал ±0,05 для желтого цвета, относительно заданных значений оптической плотности [2].

Значения оптической плотности для разных типов плашек представлены в таблице.

Плотность плашек

Вид рулона	Материал	C	M	Y	K
Широкий рулон	Бумага	1,25	1,25	1,0	1,5
	Пленка	1,25	1,2	1,0	1,4
Узкий рулон	Бумага	1,25	1,25	1,0	1,5
	Пленка	1,25	1,2	1,0	1,4

Растискивание. Сбалансированного тоновоспроизведения можно достичь, если основывать общее растискивание на профиле печатной машины. Допустимые отклонения для машинных проб негативов 30% и 70% составляют 5% для площади точки полученной при построении характеристики машины.

Если растискивание точки пурпурного цвета машиной цветопробы соответствует −5% относительно эталона, поддержание баланса будет осуществляться, если оставшиеся цвета будут иметь растискивание равное эталонному значению или превышать его.

Чтобы понять, насколько качественно проведена допечатная подготовка, проводится оценка тоновоспроизведения при печати. Для контроля печатного процесса используется денситометр.

Проблема контроля оптической плотности во флексографии связана с использованием специфических материалов, например, обладающих высокой степенью глянца. Подобные оптические свойства поверхности делают некорректными прямые денситометрические измерения.

Казалось бы, в этом случае большую точность измерений можно получить спектрофотометром, но спектральные характеристики красок во флексографиии зачастую отличатся от традиционных, что приводит к сильной погрешности измерений. Выбирая их двух более точный метод, останавливаются на денситометре [4].

Большая часть денситометров использует при расчете формулу Шеберстова−Мюррэя−Девиса:

$$S_i = \frac{1-10^{D_{iП}}}{1-10^{D_{КР}}} \times 100, \quad (1)$$

где S_i − площадь растрового элемента i-ого поля оттиска в процентах; $D_{iП}$ − оптическая плотность i-ого поля; $D_{КР}$ − оптическая плотность эталонной красочной плашки.

Но по общим представлениям размер растрового элемента определяется следующими величинами:

$$S_{iОТТ} = S_{iФ/Ф} + \Delta S_{iМЕХ} + \Delta S_{iОПТ}, \quad (2)$$

где $S_{iОТТ}$ −площадь растрового элемента i-ого поля оттиска (%); $S_{iФ/Ф}$ −площадь растрового элемента i-ого поля фотоформы (%); $\Delta S_{iМЕХ}$ −механическое растискивание растрового элемента i-ого поля оттиска (%); $\Delta S_{iОПТ}$ −оптическое растискивание растрового элемента i-ого поля оттиска (%).

Однако при использовании этого алгоритма, достоверность расчета будет зависеть от запечатываемого материала. Растискивание будет включать все три показателя при печати на впитывающих материалах, при которой каждая из величин растискивания является переменной. Если печать осуществляется на невпитывающих материалах, механическое растискивание будет практически неизменно.

Исходя из результатов измерений, выполненных на невпитывающих материалах, возможна неправильная интерпретация результатов из-за того, что изменение площади растровой точки формируется при изменении только оптического растискивания (светорассеяния).

Поэтому денситометрический метод измерения, основанный на формуле Шеберстова−Мюррэя–Девиса при оценке печати на невпитывающих материалах не полностью достоверен. Для получения более точных результатов дополнительно должен учитываться показатель светорассеяния Юла-Нильсена. Поэтому денситометр во флексографской печати должен работать по алгоритму, учитывающему поправочный коэффициент.

Список литературы

1. FIRST (Flexographic Image Reproduction Specification & Tolerances) − Воспроизведение изображения флексографским способом: допуски и спецификации / пер. с англ. Киев: Украинская Флексографская Техническая Ассоциация, 2002. 172 с.

2. Научно-технический журнал «Флексо Плюс − флексография и специальные виды печати». М.: Изд-во «Курсив», 2006. №4 (52).

3. Допечатная подготовка. [Электронный ресурс] URL: https://slovodelo.ru/poleznye-materialy/dopechatnaya-podgotovka (дата обращения: 29.10.20).

4. Замечания о корректности измерения тоновоспроизведения во флексографии. [Электронный ресурс] URL: http://www.flexoplus.ru/archive/15/nissa1.html (дата обращения: 29.10.20).

Соколова Ольга Вячеславовна, магистрант, sokolovalova.lova@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

PRINT PREPARATION IN FLEXOGRAPHY

O.V. Sokolova

The difficulties arising in flexographic printing and the ways to eliminate them at the stage of prepress are considered. The specificity of prepress preparation of vector and raster image elements, work with the accuracy of color reproduction and transitions are described.

Key words: flexography, prepress, vector graphics, raster graphics, reproduction, color.

Sokolova Olga Vyacheslavovna, undergraduate, sokolovalova.lova@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 05.02.13

РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИИ РАСТРОВОЙ ТОЧКИ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ВНЕСЕНИЯ ПРЕДЫСКАЖЕНИЙ

С.Ю. Ямилинец

В данной статье будут проверены теоретические расчеты проскальзывания растровой точки. И рассмотрена возможность создания методом офсетной печати прогнозируемой растровой точки на бумаге и её автоматическая компенсация. Это позволит повысить качество печати и цветопередачу оригинал-макетов, что крайне важно при печати защищенной продукции.

Ключевые слова: офсет, растискивание, автоматизация, цветопередача.

В офсетной печати цвет зависит от размеров растровой точки [1, 2]. Процессы, искажающие её, могут компенсироваться на стадиях допечатной подготовки. Для этого необходимо добиться стабильного искажения точки и внести поправки в допечатный процесс, что позволит настроить автоматизированный процесс компенсации в рабочем потоке полиграфических процессов [3].

Искажение размеров растровой точки приводит к различию оттенков воспроизводимого цвета. Для вычислений использовалась математическая модель неизбежной деформации растровой точки [1], которая нуждается в экспериментальной проверке и корректировке в зависимости от свойств бумаги варианта способа офсетной печати.

На листы бумаги способами «сухой офсет» и «традиционный офсет» с увлажнением наносились метки регистра на двух видах бумаг для оптической системы измерения TECHKON RMS 910.

Таким образом, можно сказать, что на деформацию точки в «сухом» офсете влияет только упругие свойства ОРТП и бумаги и в случае «традиционного» офсета – увлажняющий раствор, ОРТП, бумага. После печати при помощи оптической системы измерения RMS 910 определены размеры всех 6 точек регистрационной метки.

Для экспериментального подтверждения математической модели расчета механического проскальзывания ОРТП необходимо получить значения искажения метки отпечатанных способом «сухого» офсета, которые будет ниже приведены в табл. 1 и 2. [1].

Кроме этого, для дальнейшего анализа необходимо измерить изменения размера точки. Рис.1 изображает происходящие изменения в ходе печатного процесса: бумаге - 1; ОРТП при сведении цилиндров - 2, на форме - 3.

Таблица 1

Размеры точки метки при печати способом «сухой» офсет

Место расположения краски	Площадь	Длина (b)	Ширина (a)
Печатная форма (металл), пиксель	300000	600	600
Офсетная бумага, пиксель	330152	650±2	645±2
Мелованная бумага, пиксель	305397	625±2	622±2

Таблица 2

Размеры точки метки при печати способом «традиционный» офсет

Место расположения краски	Площадь	Длина (b)	Ширина (a)
Печатная форма (металл), пиксель	300000	600	600
Офсетная бумага, пиксель	330152	848±200	645±2
Мелованная бумага, пиксель	305397	791±189	622±2

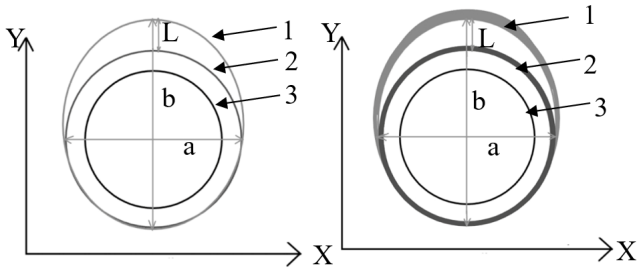


Рис.1. Изменение формы точки метки регистра RMS 910 при печати I – печать способом «сухой офсет»; II – печать способом «традиционный офсет» с увлажнением формы

Как можно увидеть на рис. 1, капля краски, имеющая правильный вид круга на металлической печатной форме, при сведении цилиндров, увеличивается в размерах (раздавливается). При переносе краски на лист бумаги точка метки регистра RMS 910 приобретает искаженную форму круга. Размеры точки с искаженными размерами по длине и ширине приведены на рис.1. Полученные данные подтверждают, что деформации изображений точки обусловлены способом печати, параметрами печатного процесса, структурой и свойствами запечатываемых материалов (бумаги). В «сухом» офсете эффект искажения формы круга в направлении движения запечатанного материала максимален на более шероховатой бумаге без покрытия, что видно в табл. 1.

Как видно из табл. 3, наиболее приближенную величину к расчетной продемонстрировала печать на немелованной бумаге способом «сухой» офсет.

Механического раздавливания точки, невозможно избежать, так как краска образует каплю на печатной форме, которая раскатывается в печатных парах печатной машины при давлении порядка 0.5 МПа, рис.2.

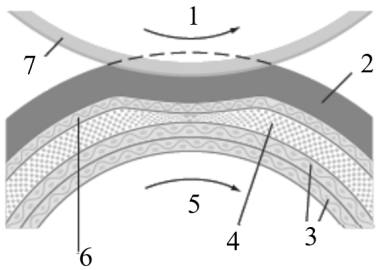


Рис. 2. Сечение участка контакта формного и офсетного цилиндров: 1 – формный цилиндр; 2 – рабочий (покровный) слой; 3 – ткань слабоэластичная, сжимающаяся; 4 – (компрессионный) микрослой; 5 – офсетный цилиндр; 6 – ткань высокоэластичная; 7 – печатная форма

Таблица 3

Экспериментальные и расчетные значения размеров точки на печатной форме и отпечатках, полученных различными способами

Параметры	Сухой офсет		Традиционный офсет	
	Мелованная	Офсетная	Мелованная	Офсетная
Натиск, мкм	100	180	100	180
Точка на форме, мкм	600	600	600	600
Расчетное, мкм	2,1…2,2	5,1…5,2	2,1…2,2	5,1…5,2
Фактическое, мкм	3,1…3,2	5,5…5,6	3…5	5,5…9
Разность	0,9…1	0,1…0,4	0,9…2,9	0,4…3,9

Экспериментально определенное увеличение размера точки, вследствие проскальзывания ОРТП вдоль металлической формы, совпадают с расчетными величинами в случае печати на «офсетной» бумаге. Это обусловлено тем, что краска на оф-

сетной шероховатой и микропористой бумаге (шероховатость по Паркеру 4,5…5,5 мкм) быстро впитывается и не создает скользкой прослойки между резиной и бумагой.

Мелованные бумаги имеют меньшую шероховатость (шероховатость по Паркеру 1,6…2,0 мкм) и микропористость и, соответственно, впитывающую способность. Краска создает скользкую прослойку между резиной и мелованной бумагой, что увеличивает деформацию сдвига полотна.

Заключение: Офсетная печать на мелованной бумаге и бумаге без покрытия дает математически прогнозируемое неизбежное, но частично корректируемое на стадии допечатной подготовки печатной формы, искажение длины элементов отпечатка, а также дополнительное случайное искажение длины точечных изображений, зависящее от варианта офсетного способа печати, структуры и впитывающей способности бумаги. Дополнительное случайное искажение длины отпечатков минимально (0,1…0,4 мкм) при использовании варианта способа печати «сухой» офсет на немелованной бумаге без покрытия.

Автоматизированный процесс компенсации деформации растровой точки по расчетным значениям для повышения стабильности цвета рекомендуется применять при печати на немелованной бумаге офсетным способом без увлажнения пробельных элементов.

Список литературы

1. Ямилинец С.Ю. Расчет механического проскальзывания в офсетной печатной паре без увлажнения пробельных элементов // News of higher educational institutions. Problems of printing and publishing, №3. 2011. С. 62-78.

2. Кулак М.И. Закономерности влияния давления печатного контакта на изменение размера растровых точек // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2007. № 1. С. 61-67.

3. Медяк Д.М. Структурная модель оптического растискивания растровых точек // Труды БГТУ. Сер. IX. Издат. дело и полиграфия. 2008. Вып. XVI. С. 22-25.

Ямилинец Станислав Юрьевич, аспирант, Ymlnz@yandex.ru, Россия, Москва, Московский политехнический университет

COLCULATION DOT GAIN FOR AVTOMATIZATION COLEBRATION PROCESS

S.U. Yamilinets

In this article, we will test the theoretical calculations of raster slur. And the possibility of creating a predicted raster on paper using offset printing and its automatic compensation is considered. This will improve the print quality and color reproduction of the original design, which is extremely important when we print securities.

Key words: offset, dot gain, automatization, color rendering.

Yamilinets Stanislav Uryevich, postgraduate, Ymlnz@yandex.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University

УДК 621.9

АНАЛИЗ МОЩНОСТИ ПРИВОДА БУНКЕРНОГО ЗАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА С ВРАЩАЮЩИМИСЯ ЗАХВАТЫВАЮЩИМИ ОРГАНАМИ

Э.В. Дьякова

Рассматривается методика расчета для конструирования бункерных загрузочных устройств и ее основные этапы, анализируется мощность привода для БЗУ с вращающимися захватывающими органами от числа оборотов захватывающих органов и от коэффициента трения.

Ключевые слова: бункерное загрузочное устройство, мощность привода, автоматическая загрузка, захватывающие и ориентирующие механизмы.

В настоящее время для того чтобы обеспечить надежную автоматическую подачу штучных изделий в заданном ориентированном положении с необходимой производительностью используют системы автоматической загрузки на базе дисковых механических бункерных загрузочных устройств (БЗУ). В БЗУ заготовки сосредотачиваются беспорядочно в бункере, который выполняет несколько функций: это запас заготовок для бесперебойной работы механизма, обеспечение движения заготовок к захватывающим органам для заданной производительности, а также бункер подготавливает заготовки к захвату. Для их ориентации и подачи используются захватывающие органы. Так существуют огромное разнообразие конструкций БЗУ.

Анализ работ показал, что универсальными конструкциями можно считать БЗУ с вращающимися захватывающими органами [1, 2].

Работа абсолютно любого БЗУ основывается на принципе вероятностного захвата заготовок из общей массы. В бункере заготовки находятся в неориентированном положении, поэтому только некоторые окажутся в благоприятном положении и будут захвачены захватывающим органом. Методика расчета для конструирования БЗУ состоит в следующем. Исходными данными являются физико-механические и геометрические параметры заготовок, требуемое ориентированное положение заготовки и требуемая производительность машины. К геометрическим параметрам относятся форма заготовки, высота и длина заготовки, наружный и внутренний диаметры заготовки, положение и координата центра масс, длины и диаметры стержня и головки, радиус закругления заготовки. К физико-механическим параметрам относятся масса заготовки, покрытие, коэффициент трения скольжения, прочность и т.д. Методика расчета основывается на комплексном анализе свойств и параметров заготовок. Она состоит из нескольких этапов. Также следует знать, что необходимая производительность БЗУ должна быть выше производительности технологической машины. На первом этапе конструируется захватный механизм, захватывающие и ориентирующие органы БЗУ. На втором этапе необходимо построить аналитическую модель производительности БЗУ от окружной скорости захватывающих органов. Для этого определяют максимальную окружную скорость. На третьем этапе рассчитывают коэффициент выдачи и фактическую производительность. На последнем этапе производится расчет конструктивных элементов. Таких элементов, как бункер, привод БЗУ [3-7].

Конструкции приводов для захватывающих и ориентирующих механизмов различны, они влияют на производительность, стоимость и удобств обслуживания БЗУ.

Привод – это устройство, которое обеспечивает движение всех рабочих органов БЗУ. Так при расчете необходимо определить его мощность, которая определяется по формуле:

$$N = \frac{k_З n M_{кр}}{\eta_{мех}},$$

где k_3 – коэффициент возможной перегрузки (k_3 = 2); n – частота вращения захватывающего органа БЗУ, $с^{-1}$; $\eta_{мех}$ – механический коэффициент полезного действия привода; $M_{кр}$ – необходимый крутящий момент, $Н \cdot м$.

Величина крутящего момента при дисковом захватывающем органе определяется

$$M_{кр} = TR + yG_2 \sin\alpha + \mu G_2 \cos\alpha \frac{y}{\cos 45°},$$

где $T = \mu G_2 \sin\alpha$ – силы трения, Н; R − радиус захватывающих органов; y – координата центра тяжести объема, имеющего форму подковы, равная $\frac{3}{16}R$, м; G_2 – сила тяжести одновременно загружаемых в бункер заготовок, H; α – угол наклона бункера дискового БЗУ (обычно равен 45°); μ – коэффициент трения между диском и подпятником.

Если угол наклона бункера равен 45^0, то величина крутящего момента определяем по приближенной формуле

$$M_{кр} \approx 0{,}49 G_2 R_2,$$

Сила тяжести одновременно загружаемых в бункер заготовок определяется

$$G_2 = k_1 \frac{V_1}{V_0} G_0,$$

где k_1 − коэффициент заполнения бункера; V_1 – объем одновременно загружаемых в бункер заготовок, $м^3$; V_0 − объем одного изделия по внешнему контору, $м^3$.

Так необходимо проанализировать мощность привода БЗУ с вращающимися захватывающими органами при загрузке и ориентировании заготовки, на примере полуфабриката с параметрами $d_1 = 0{,}015$ м; $d_2 = 0{,}011$ м; $h = 0{,}012$ м; $h_1 = 0{,}0025$ м. Данный полуфабрикат изготавливается двухсторонним полугорячим выдавливанием. Технологический процесс производства является сложным, так как состоит из целого ряда операций, которые осуществляются на высокопроизводительных роторных линиях.

Результат моделирования мощности привода БЗУ с вращающимися захватывающими органами представлен на рисунке.

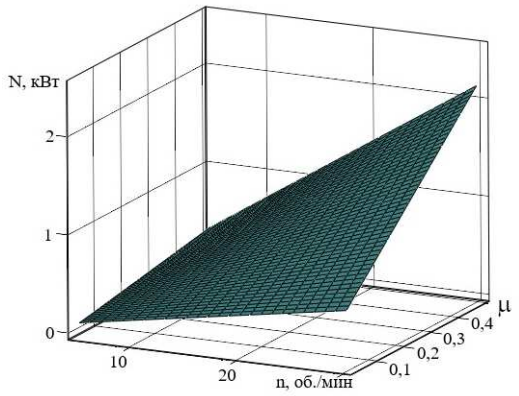


Рис. График зависимости мощности привода бункерного загрузочного устройства с вращающимися захватывающими органами от числа оборотов захватывающих органов и от коэффициента трения

Анализ графика показывает, что при числе оборотов захватывающих органов $n = 10$ об./мин. и при коэффициенте трения μ от 0,1 до 0,4 мощность привода N увеличивается от 0,3 до 0,9 кВт. При числе оборотов $n = 20$ об./мин. и при коэффициенте

трения μ от 0,1 до 0,4 мощность привода *N* увеличивается от 0,5 до 1,3 кВт. При $n = 30$ об./мин и при коэффициенте трения μ от 0,1 до 0,4 мощность привода *N* увеличивается от 0,7 до 2,1 кВт.

Анализируя график, можно сделать вывод, что мощность привода БЗУ с вращающимися захватывающи органами зависит от числа оборотов захватывающих органов и от коэффициента трения. Чем больше значение коэффициента трения и больше число оборотов, тем необходимая мощность привода будет больше. Данные результата следует принять во внимание для дальнейших изучений автоматической загрузки и ориентации полуфабриката в БЗУ с вращающимися захватывающими органами.

Список литературы

1. Голубенко В.В., Давыдова Е.В., Прейс В.В. Совершенствование зубчатого бункерного загрузочного устройства для предметов обработки с неявно выраженной асимметрией торцов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. Вып. 2. Ч. 1. С. 27-34.

2. Пантюхина Е.В., Прейс В.В., Хачатурян А.В. Механические дисковые бункерные загрузочные устройства для стержневых деталей с неявно выраженными ключами ориентации// Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. 2018. № 3 (3). С. 16-25.

3. Голубенко В.В., Давыдова Е.В. Вопросы проектирования дискового зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. № 3. С. 11-16.

4. Давыдова Е.В., Прейс В.В. Методика расчета и проектирования механических дисковых бункерных загрузочных устройств // Известия Тульского государственного университета. Сер. Машиноведение, системы приводов и детали машин: спец. вып. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. С. 57-64.

5. Давыдова Е.В., Прейс В.В. Аналитическая модель и методика расчёта производительности вертикального бункерного загрузочного устройства // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. №9. С. 27-31.

6. Давыдова Е.В., Прейс В.В. Теоретические основы проектирования дискового зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. № 7. С. 8-14.

7. Давыдова Е.В., Прейс В.В. Теоретические основы проектирования механических дисковых бункерных загрузочных устройств // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 7. Ч. 1. С. 10-20.

Дьякова Элеонора Владимировна, аспирант, eleonora.borovkova@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYSIS OF THE DRIVE POWER OF HOPPER-FEEDER DEVICE WITH ROTATING GRIPPING BODIES

E.V. Diakova

The method of calculation for the design of hopper loading devices and its main stages are considered, the power of the drive for BZU with rotating gripping bodies on the number of revolutions of the gripping bodies and on the coefficient of friction is analyzed.

Key words: hopper-feeder device, drive power, automatic feeding, exciting and orienting mechanisms.

Diakova Eleonora Vladimirovna, postgraduate, eleonora.borovkova@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.798:664 (075.8)

ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОДНОШНЕКОВОГО ЭКСТРУДЕРА ПРИ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ ЕГО РАБОТЫ

А.М. Рожков

В статье проведены исследования, позволяющие оценить производительность экструзионного оборудования для производства полимерных пленок в зависимости от параметров шнека экструдера при учете критической частоты его вращения, определены диапазоны производительностей для различных параметров.

Ключевые слова: производство полимерных пленок, экструзия полимера, шнек экструдера.

Для производства полимерных упаковочных материалов широко используют экструдеры, которые осуществляют переработку гранул полимера в однородный состав и формование из него материалов. Основными конструктивными элементами экструдеров являются следующие зоны:

загрузки гранул полимера с охлаждающей системой;

рабочая, включающая вращающийся в цилиндрическом корпусе с постоянной угловой скоростью шнек,

выгрузки расплава полимера [1].

На рис 1. представлена схема одношнекового экструдера.

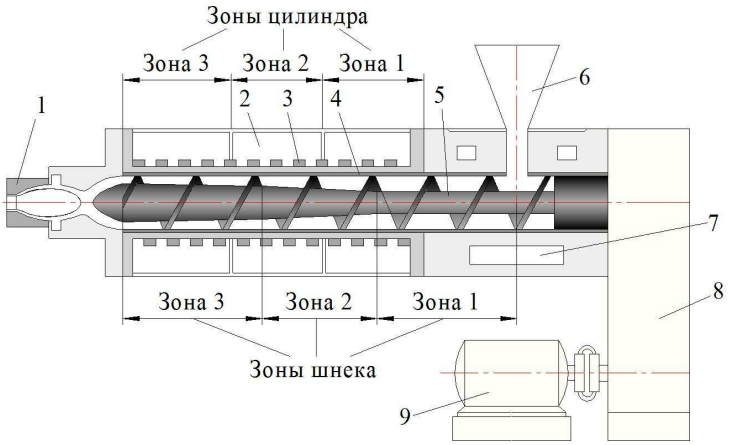


Рис. 1. Схема одношнекового экструдера: 1 – измерительная головка; 2 – охладительные каналы; 3 – нагревательные элементы; 4 – цилиндрический корпус; 5 – вращающийся шнек; 6 –загрузочная воронка; 7 – полость для циркуляции воды; 8 – двухступенчатый цилиндрический редуктор; 9 – электродвигатель

На схеме указаны три зоны цилиндра (1 – входная, 2 – с нагревательными элементами, 3 – с каналами охлаждения) и шнека (1 – подачи, 2 – пластикации, 3 – выталкивания – моторинг-зона) (см. рис. 1).

Полимерный материал подается в воронку 6 и оказывается на шнеке 5, который обеспечивает транспортировку и равномерную подачу гранулята полимера сначала в зону подачи, а затем пластификации, где он плавится с помощью нагревательных элементов 3, во-вторых, его гомогенизирование и, в-третьих, сжатие в зоне нагнетания, и в дальнейшем полимер в таком состоянии направляется к выходу через измерительную головку 1 с датчиками контроля давления и температуры. Вращение шнека 5 обеспечивается электродвигателем 9 через редуктор 8.

Наиболее широко известны экструдеры следующих производителей. Производительность одношнековых экструдеров серии *Scientific* LE45-30 и LE40-30 варьируется в диапазоне от 30 до 60 кг/ч при частотах вращения шнека от 0 до 300 об./мин. Экструдеры SLE 1-70, SLE 1-90, SLE 1-115, SLE 1-130 и SLE 1-150 обеспечивают производительность процесса от 120 до 1000 кг/ч при мощности привода от 37 до 132 кВт/ч. Каскадные экструдеры этой же фирмы SLE К-90 и SLE К-125 обеспечивают производительность процесса от 300 до 600 кг/ч при мощности привода от 30 до 37 кВт/ч.

Одной из основных количественных характеристик экструдера является производительность Q (кг/ч), которая определяется по формуле

$$Q = 60\pi Dh\cdot(1-e/t)\cdot\frac{w}{h+w}\cdot\left[\frac{\pi Dn\cdot\sin\varphi\cos\varphi}{2}-\frac{\Delta p\cdot h\cdot\sin^2\varphi}{2H\left(\frac{1}{\sin\alpha}-\frac{V_t\,\mathrm{tg}\alpha}{V_r+V_t\,\mathrm{tg}\alpha}\right)\cdot L}\right],$$

где D – диаметр вращающегося шнека; h – высота витков; t – шаг витков шнека; e – толщина витков; w – расстояние между соседними витками; φ – угол винтовой нарезки шнека; L – длина шнека; Δp – противодавление на выходе зоны дозирования; V_r – скорость релаксации; H – константа пристенной вязкости; V_t – скорость движения пробки расплава; α – угол взаимодействия; n – частота вращения шнека.

В работе [2] было проведено исследование влияния на производительность экструдера диаметра вращающегося шнека и угла его винтовой нарезки от частоты его вращения в диапазоне от 0 до 100 об./мин для шнека с геометрическими параметрами e = 6 мм, L = 1500 мм, h = 5 мм, w = 40 мм. Было проанализировано влияние частоты вращения шнека, его габаритных размеров, а также параметры процесса движения расплава полимера на производительность зоны дозирования. Было показано, при увеличении диаметра и угла винтовой нарезки шнека производительность зоны дозирования процесса соэкструзии увеличивается при увеличении диаметра с 40 до 60 мм в 1,44 раза, а при увеличении угла винтовой нарезки шнека с 10 до 20° – в 1,53 раза. При этом производительность зоны дозирования в зависимости от конструктивных и кинематических параметров шнека в диапазоне частот его вращения от 20 до 100 об./мин составляет от 20 до 120 кг/ч для рассматриваемого полимера [2].

С целью выбора оптимальных параметров рабочих органов экструдера необходимо более широко оценить влияние его конструктивных и кинематических параметров на количественную характеристику его работы – производительность.

В рекламном буклете компании, производящей комплектующие для экструзионного оборудования, представлены диапазоны основных геометрических параметров шнека: диаметр вала d шнека от 35 до 92 мм; диаметр D вращающегося шнека от 77 до 188 мм, длина L шнека от 810 до 2000 мм [3]. Проведем исследование производительности одношнекового экструдера для указанных диапазонов геометрических параметров.

Для определения диапазона допустимых частот вращения шнека, воспользуемся зависимостью ее критического значения в зоне загрузки по следующему соотношению

$$n_{\text{к}} = \frac{42{,}2}{\sqrt{D}},$$

представленную в работе [4], графическая зависимость которой при диаметрах шнека в диапазоне от 75 до 200 мм показана на рис. 2.

На рис. 3 показаны графики производительности $Q(n)$ одношнекового экструдера в зависимости от диаметра шнека в диапазоне от 70 до 200 мм и частоты его вращения от 0 до 200 об./мин для шнеков следующих типов: тип 1: $e = 5$ мм, $L = 900$ мм,

$h = 5$ мм, $w = 40$ мм (рис. 3, а); тип 2: $e = 6$ мм, $L = 1200$ мм, $h = 7$ мм, $w = 45$ мм (рис. 3, б); тип 3: $e = 6$ мм, $L = 1500$ мм, $h = 10$ мм, $w = 50$ мм (рис. 3, в); тип 4: $e = 8$ мм, $L = 2000$ мм, $h = 12$ мм, $w = 60$ мм (рис. 3, г).

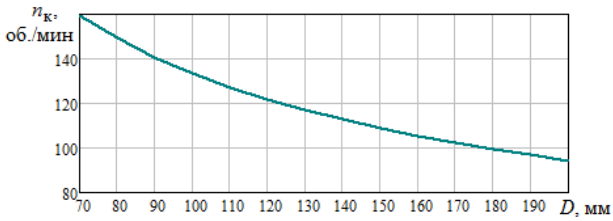


Рис. 2. График зависимости критической частоты вращения шнека в зоне загрузки в зависимости от диаметра шнека

На каждом из графиков была построена кривая производительности $Q(n_к)$ в зависимости от критического значения частоты вращения шнека.

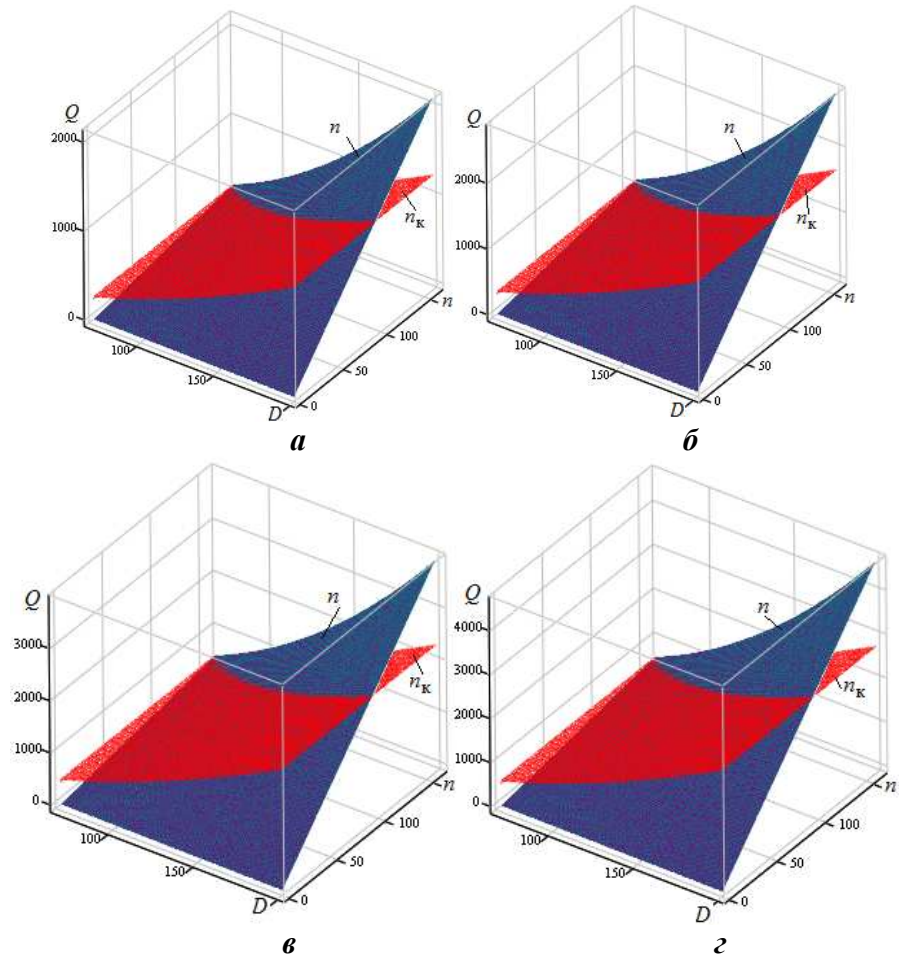


Рис. 3. Графики зависимостей производительности одношнекового экструдера в зависимости от диаметра шнека и частоты его вращения для шнеков четырех типов: тип 1 (а), тип 2 (б), тип 3 (в), тип 4 (г)

Графики показывают, что производительность одношнекового экструдера в зависимости от частоты вращения n шнека теоретически может составлять от 30 до 4500 кг/ч в зависимости от параметров шнека (синяя поверхность). Однако при учете критической частоты $n_к$ вращения шнека производительность шнека ограничена (красная поверхность) значениями от 30 до 2500 кг/ч.

Список литературы

1. Рожков А.М. Анализ оборудования для процесса экструзии полимеров // Молодежный вестник Политехнического института: сб. статей. Тула, 2020. С. 46-49.
2. Рожков А.М. Анализ производительности экструдера для производства многослойных упаковочных пленок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 10. С. 455-459.
3. Справочник по продукции: шнеки, цилиндры, приспособления ООО «КАПЛАСТ». [Электронный ресурс] URL: http://s.siteapi.org/32b795b2d2fd783/ docs/6d1b92a508ea2ec0dfd215dcfeb9959017e1e232.pdf (дата обращения: 13.11.2020).
4. Литвинец Ю.И. Технологические и энергетические расчеты при переработке полимеров экструзией. Екатеринбург, УГЛТУ. 2010. 55 с.

Рожков Александр, Михайлович, магистрант, rojkov.am@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

EVALUATION OF THE MAXIMUM PERFORMANCE OF A SINGLE-SCREW EXTRUDER UNDER OPTIMAL OPERATING CONDITIONS

Rozhkov A.M.

The article presents studies that allow evaluating the performance of extrusion equipment for the production of polymer films depending on the parameters of the extruder screw, taking into account the critical frequency of its rotation, and defines the performance ranges for various parameters.

Keywords: production of polymer films, polymer extrusion, extruder screw.

Rozhkov Alexander Mikhailovich, undergraduate, rojkov.am@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 655.326.1; 675.043.85

ОСОБЕННОСТИ РАСТВОРИТЕЛЕЙ ДЛЯ ФЛЕКСОГРАФСКИХ КРАСОК

О.В. Соколова

Рассматривается состав красок для флексогафской печати, описываются особенности растворителей и требования, предъявляемые к ним. Анализируется баланс разбавителя при испарении на примере n-пропилацетата.

Ключевые слова: флексография, краска, растворитель, компоненты, вязкость, баланс растворителя.

Выбор красок для флексографсой печати обуславливается поставленной задачей. Все краски отличаются по свойствам, особенностям работы и составу. Краски на основе летучих растворителей и некоторые виды водорастворимых красок содержат в своем составе растворители. Для водорастворимых красок в роли растворителей выступают спирты или вода. Краски на основе растворителей, как следует из названия, в значительной степени зависят от правильно выбора растворителя и точности его использования. Рассмотрим подробнее роль, которую играют растворители во флексографской печати.

Так как основные составляющие краски – красящий пигмент и смолы представляют из себя твердые вещества, главной задачей растворителя является преобразовать их в жидкое состояние, подходящее для нанесения на поверхность материала.

Связующее вещество флексографской краски образуется именно при помощи растворителя при размягчении смол, входящих в ее состав. Как следует из понятия, роль связующего заключается в закреплении (связывании) красочного пигмента с запечатываемым материалом. Связующее определяет все печатно-технические свойства красок, в том числе и их стойкость. В общем виде флексографская краска представлена на рис.1.

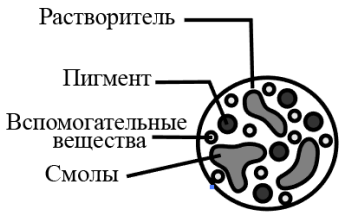


Рис. 1. Структкра флексографской краски

Во время печати растворитель испаряется или впитывается, а связующее вещество, образовавшееся из смол, формирует на запечатываемой поверхности пленку с пигментом, закрепляя таким образом печатное изображение [1].

В зависимости от поставленных задач доля составляющих компонентов флексографских красок может меняться в рамках определенных диапазонов. Доля красящего вещества (пигмента) варьируется от 15 до 40%, доля растворителя от 40 до 60%, связующего (смол) – 10…15% и вспомогательных добавок от 0 до 5% [2].

Пример состава флексографской краски на основе летучих растворителей представлен на рис.2.

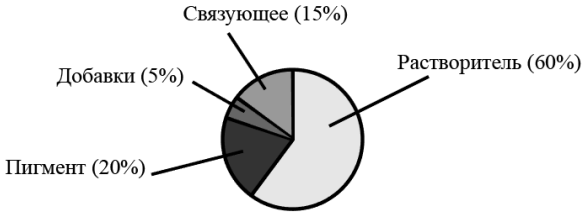


Рис. 2. Пример состава флексографской краски

Если количество какого-то компонента в составе меняется, производится перераспределение доли и других компонентов – происходит изменение соотношений.

Если в краску добавить больше пигмента, потребуется дополнительно добавить и связующее, которое позволит закрепить на поверхности имеющийся пигмент, в итоге изменение пропорций отразится на растворителе. Этот принцип объясняет, почему более пигментированные печатные краски более густые и вязкие.

К растворителям предъявляется целый ряд требований:

1. Растворять смолы до выбранного в условиях конкретного печатного процесса состояния;
2. Полностью удаляться путем испарения или впитывания;
3. Не иметь сильного запаха в красочной пленке;
4. Способствовать адгезии краски к запечатываемой поверхности;
5. Не оказывать негативное влияние на печатные формы;
6. Ограниченно взаимодействовать с другими составляющими краски, чтобы легко удаляться.

Оценка применимости растворителя проводится по его растворяющей способности. В растворах с большой концентрацией смол соблюдается принцип – жидкости с высокой растворяющей способностью образуют слабовязкие растворы.

По своему действию растворитель может быть активным, разбавляющим или латентным.

Растворитель, самостоятельно растворяющий смолы в составе, относится к активным. Растворитель, не растворяющий основные смолы, но дополнительно вносимый в готовый раствор смолы без повышения вязкости, относится к разбавляющим. Растворитель, не растворяющий смолу самостоятельно, но взаимодействующий с ней, делая ее растворимой в другом растворителе, относится к латентным (скрытым) [3].

Дополнительные компоненты красок также ориентированы изменять ее свойства в соответствии с заданным печатным процессом, например, изменять баланс растворимости или скорость высыхания.

При использовании смеси растворителей важно учитывать, что растворять краску должен тот, который высыхает дольше. Если последний испаряющийся растворитель не до конца растворит смолы в составе краски, начнутся проблемы с адгезией краски, ее красочностью, глянцем и стабильностью.

Во время подготовки к печати вязкость красок снижается при помощи смеси растворителей. При печати растворитель или их смесь постепенно испаряется из красочного ящика. На состав смеси образующейся при испарении влияют молекулярный вес растворителя и упругость его паров, температура, давление и прочие внешние факторы. Выбор растворителей для одной краски должен учитывать степень их схожести. Допустимые к использованию растворители определяются составителями краски. Баланс разбавителей представлен на рис.3.



Рис. 3. Баланс разбавителя при испарении

Горизонтальная ось отражает количество *n*-пропилацетата (%) в краске, содержащей смесь *n*-пропилацетата и *n*-пропилового спирта.

Вертикальная ось – количество *n*-пропилацетата (%) в растворителе, испаряющегося из красочного ящика. График показывает состав паров растворителя из разных смесей [4].

Если в начальной смеси содержится 10% *n*-пропилацетата, то пары растворителя будут содержать его уже 36%. Если доля *n*-пропилацетата в краске будет уменьшена, баланс растворителей изменится в сторону меньшего насыщения, что может спровоцировать проблемы при печати.

Чтобы избежать проблем, испаряющиеся из красочного ящика растворители должны быть замещены смесью *n*-пропилацетата и *n*-пропилового спирта в пропорции 36:64.

Каждая свежая краска, заливаемая в красочный ящик, должна быть разбавлена смесью *n*-пропилацетата и *n*-пропилового спирта до заданной вязкости. Для дальнейшего сохранения баланса растворителей в процессе печати снижение вязкости должно производиться смесью *n*-пропилацетата и *n*-пропилового спирта в пропорции 36:64.

Влияние растворителя имеет очень большое значение при печати. Использование неподходящего растворителя может вызывать различные проблемы, например, слишком быстрый растворитель, может способствовать образованию «перемычек» между растровыми точками, загрязняющих оттиск, или стать причиной изменения плотности красочного слоя. Переизбыток замедлителя в свою очередь может спровоцировать слипание рулона или растекание растровых точек.

При работе с растворителем важно соблюдать не только технические требования, направленные на стабильную и качественную работу, но и учитывать температуру вспышки и уровень воспламенения, так как большинство растворителей пожароопасны.

Список литературы

1. Флексографские краски: связующие вещества, связующие для флексографских красок, растворители. [Электронный ресурс] URL: http://www.atlasflex.ru/ articles/ flexo-pack/ flexo-pack-28.php (дата обращения: 30.10.20).

2. Флексографская печать. [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/ wiki/ Флексогафская_печать#Печатный_процесс (дата обращения: 01.11.20).

3. Сольвентные материалы в печати гибкой упаковки. [Электронный ресурс] URL: https://tanzor.ru/img/SSPP.pdf (дата обращения: 03.11.20).

4. Флексографске краски: комплексный подход. Киев: Украинская Флексографская Техническая Ассоциация, 2000. 56 с.

Соколова Ольга Вячеславовна, магистрант, sokolovalova.lova@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

FEATURES OF SOLVENTS FOR FLEXOGRAPHIC PAINTS

O.V. Sokolova

The composition of inks for flexographic printing is considered, the features of solvents and the requirements for them are described. The balance of the diluent during evaporation is analyzed using the example of n-propyl acetate.

Key words: flexography, paint, solvent, components, viscosity, solvent balance.

Sokolova Olga Vyacheslavovna, undergraduate, sokolovalova.lova@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.9; 663

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СВОЙСТВ КРАФТ-БУМАГИ ПРИ УПАКОВЫВАНИИ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

О.Д. Рожкова

В статье проведены экспериментальные исследования в лабораторных условиях по оценке способности крафт-бумаги сохранять влажность упакованных в нее хлебобулочных изделий, заключающиеся в интенсификации процесса сушки упакованного в крафт-бумагу и неупакованного изделий и сравнении параметров процесса их высыхания.

Ключевые слова: крафт-бумага, упаковка хлебобулочных изделий, бумажный пакет, сушка изделий.

Крафт-бумага в виде простых упаковочных пакетов или пакетов с полиэтиленовым смотровым окном широко применяется для упаковки свежевыпеченных, в том числе горячих, хлебобулочных изделий и выпечки перед непосредственной выдачей упакованного изделия покупателю (батоны, круассаны, булочки и др.).

Крафт-бумага является высокопрочной оберточной бумагой коричневого цвета, которая состоит из слабопроваренной длинноволокнистой сульфатной целлюлозы. Крафт-бумага пропускает воздух, имеет низкую стоимость, экологична, так как в ней отсутствуют вредные вещества, и она разлагается в течение 2-3 лет без вреда для окружающей среды. При всём при этом она сохраняет свою форму. В тоже время крафт-бумага, изготавливаемая из крупноволокнистой целлюлозы со сравнительно крупными порами, хорошо «дышит» [1, 2].

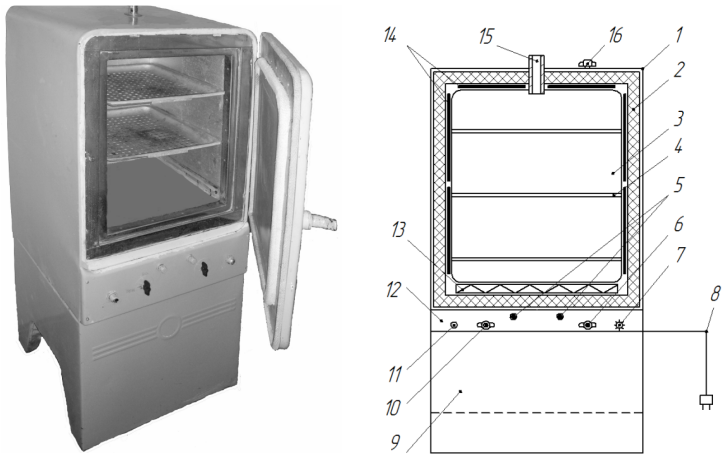
Эти свойства способствуют выбору именно крафт-бумаги среди других типов упаковочных материалов при упаковывании хлебобулочных изделий. В пакетах из крафт-бумаги изделие сохраняет свою форму, и долгое время является свежим благодаря образовавшейся корочке.

Неупакованные хлебобулочные изделия, как известно, легко подвергаются высыханию в естественных условиях. В процессе высыхания из изделия удаляется влага путем ее испарения и отвода образовавшихся паров [3].

Для того чтобы оценить свойства крафт-бумаги по сохранению упакованного в нее хлебобулочного изделия от высыхания и сравнить их с неупакованным хлебобулочным изделием, были проведены экспериментальные исследования.

Для эксперимента было взято два хлебобулочных изделия одинаковой массы, контролируемой на лабораторных весах с высокой степенью точности. Одно изделие было упаковано в пакет из крафт-бумаги, второе – не было упаковано. Оба изделия одновременно подвергались процессу сушки в равных условиях.

Для интенсификации процесса сушка проводилась в лабораторном сушильном шкафу [4], который подключается к сети электропитания с помощью шнура (рис. 1).



а ***б***

Рис. 1. Сушильный шкаф: а – общий вид; б – схема:
1 – корпус; 2 – теплоизолирующий материал; 3 – сушильная камера;
4 – выдвижные полки; 5 – предохранительный блок; 6 – тумблер терморегулировки; 7 – датчик работы; 8 – сетевой шнур; 9 – стойка;
10 – тумблер включения; 11 – управляющее гнездо; 12 – панель управления;
13 – нагревательный элемент; 14 – теплоизолирующая плита;
15 – термогнездо; 16 – компенсирующий тумблер терморегулировки

Два хлебобулочных изделия, одно из которых упаковано в крафт-бумагу, помещается в сушильную камеру на выдвижные полки. Включение шкафа осуществляется тумблером, находящегося на панели управления, и при помощи тумблера терморегулировки задаётся нужная температура. Нагревательный элемент передаёт тепло внутрь сушильной камеры, не преодолевая теплоизолирующих плит и материала. Для температурной оценки внешним мерительным устройством предусмотрено термогнездо.

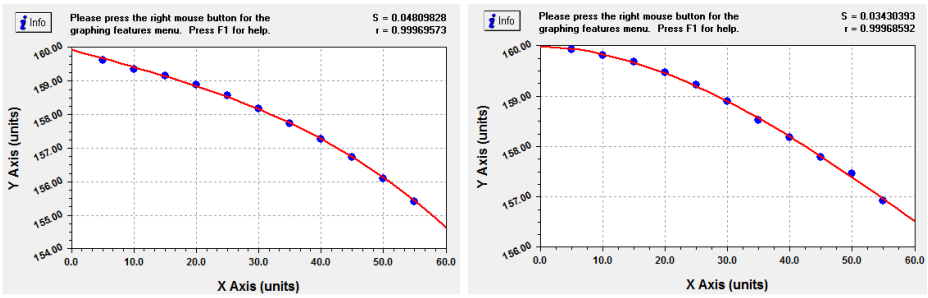
Эксперимент проводился следующим образом. Предварительно была определена и сделана одинаковой масса каждого хлебобулочного изделия, составившая 160 г. В сушильный шкаф выдвижные полки были установлены два хлебобулочных изделия, одно из которых упаковано в крафт-бумагу (I), а другое нет (II). Каждые 5 минут в течение одного часа на лабораторных весах, находящихся в непосредственной близости с сушильным шкафом, замерялась масса каждого хлебобулочного изделия.

Результаты измерений массы хлебобулочных изделий в течение указанного промежутка времени внесены в табл.

Результаты экспериментальных исследований процесса сушки упакованного и неупакованного изделий были обработаны с помощью программы *CurveExpert* 1.4, с помощью которой была осуществлена аппроксимация результатов эксперимента (рис. 2).

Результаты экспериментальных исследований потери массы двух типов хлебобулочных изделий при их сушке

Вид	Масса изделия (г) в каждом интервале времени (мин)												
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
I	160,00	159,93	159,81	159,68	159,47	159,22	158,89	158,52	158,18	157,78	157,46	156,92	156,52
II	160,00	159,61	159,34	159,16	158,89	158,56	158,17	157,74	157,28	156,72	156,09	155,40	154,66



а ***б***

Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований процесса сушки упакованного в крафт-бумагу (а) и неупакованного (б) хлебобулочных изделий и результаты аппроксимации

На рис. 3 представлены результаты аппроксимации экспериментальных исследований на одном графике, позволяющем оценить, как изменяется в процессе сушки в лабораторном сушильном шкафу масса упакованного в крафт-бумагу хлебобулочного изделия (верхняя кривая) и неупакованного изделия (нижняя кривая).

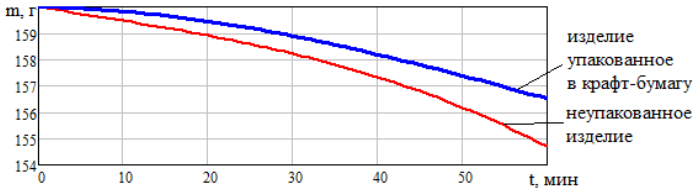


Рис. 3. Результаты аппроксимации экспериментальных исследований процесса сушки упакованного в крафт-бумагу хлебобулочного изделия (верхняя кривая) и неупакованного (нижняя кривая)

Графики показывают, что в течение 1 часа нахождения в сушильном шкафу неупакованное хлебобулочное изделие теряет в массе в процессе сушки 5,34 г, что составляет 3,34% своей первоначальной массы. Упакованное же в крафт-бумагу хлебобулочное изделие теряет в процессе сушки 3,48 г или 2,17 % своей первоначальной массы (см. рис. 3).

Таким образом, крафт-бумага позволяет в среднем сохранить влажность хлебобулочного изделия в 1,6 раза, что свидетельствует о том, что ее целесообразно использовать в качестве упаковочного материала для свежевыпеченных горячих хлебобулочных изделий.

Список литературы

1. Давыдов И.Б., Красная И.А., Пантюхина Е.В. Особенности, основные виды и область применения пищевой упаковки на основе бумаги // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 2. С. 388-394.

2. Пантюхина Е.В., Котляров В.С., Пантюхин О.В. Перспективные технологии изготовления пищевой упаковки: учебник. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 212 с.

3. Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 2000. 551 с.

4. Морозов В.Б. Процессы и аппараты пищевых, биотехнологических и смежных производств в практических задачах: учебное пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 204 с.

Рожкова Оксана Дмитриевна, магистрант, od.rozhkova@rmc-holding.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE PROPERTIES OF KRAFT PAPER WHEN PACKAGING BAKERY PRODUCTS

O.D. Rozhkova

The article presents experimental studies in the laboratory to assess the properties of Kraft paper to preserve the humidity of bakery products packed in it, which consist in intensifying the drying process of packaged and unpacked products and comparing the parameters of their drying process.

Key words: kraft paper, packaging of bakery products, paper bag, drying of products.

Rozhkova Oksana Dmitrievna, undergraduate, od.rozhkova@rmc-holding.com, Russia, Tula, Tula State University

УДК 539.612; 655.022

АДГЕЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛИГРАФИИ

О.В. Соколова

Описывается природа адгезии и влияние, которое она оказывает на печатный процесс. Рассмотрены способы оценки работы адгезии и когезии. Проанализирована зависимость между краевым углом смачивания и работой адгезии.

Ключевые слова: печать, процесс, адгезия, когезия, краевой угол, работа адгезии.

Любой печатный процесс базируется на взаимодействии касок с запечатываемыми поверхностями. Природа этого взаимодействия может отличаться в зависимости от составляющих компонентов краски и ее свойств, а также от специфических особенностей запечатываемого материала: впитывающей способности, гладкости, смачиваемости.

Именно смачивание и адгезия определяют возможность протекания печатного процесса. По сути, это две составляющие одного явления, возникающего во время контактирования жидкости, в данном случае краски, и твердого тела – поверхности запечатываемого материала.

Адгезия – это процесс поверхностного сцепления разнородных тел, обусловленный их межмолекулярным взаимодействием [1].

При печатном процессе сила взаимодействия молекул краски с молекулами запечатываемой поверхности должна быть меньше, чем силы их внутреннего взаимодействия, чтобы избежать растекания краски по поверхности (смачивание поверхности). В обратном случае, если сила внутреннего взаимодействия молекул краски значительно превышает взаимодействие их с запечатываемым материалом, на запечатываемой поверхности образуется сферическая капля без смачивания. Это два крайних случая, между которыми происходят процессы неполного смачивания. При неполном смачивании красочная капля, не растекшаяся по поверхности запечатываемого материала, образует равновесный угол с этой поверхностью, так называемый «краевой угол смачивания», рис. 1.

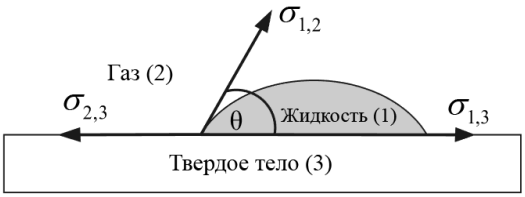


Рис.1. Краевой угол смачивания

На рисунке представлено равновесие красочной капли (жидкости) во время контактного смачивания твердой поверхности, при котором капля по поверхности не растекается до конца.

Периметр контакта кали с поверхностью находится под действием трех поверхностных сил, которые определяются по значениям поверхностных натяжений грани раздела фаз: жидкость− газ (кислород), жидкость – твердое тело, газ − твердое тело.

Сила адгезии между каплей краски и запечатываемой поверхностью способствует растеканию кали, при этом внутри кали действуют силы когезии, препятствующие этому растеканию. Силы поверхностного натяжения на границе запечатываемого материала (твердого тела) и воздуха, способствуют растяжению капли по поверхности, а на границе запечатываемого материала с краской – сжимают каплю.

Действие поверхностного натяжения на границе краски и воздуха направлено под углом к площади контакта, по касательной к поверхности капли [2].

Выполнение печати невозможно ни при полном смачивании, ни при полном несмачивании. Кроме того, для переноса краски с печатающих элементов на бумагу требуется соблюдение условий, в которых сила адгезии краски к запечатываемой поверхности и печатающим элементам будет превышать когезию.

Природа адгезии в полиграфии может быть или химической или молекулярной. Работа адгезии представляет собой сумму воздействий следующих сил:

$$W_a = W_a^h + W_a^\pi + W_a^{da} + W_a^d + W_a^i + W_a^e + W_a^p, \quad (1)$$

где h − водородная связь; π − ковалентная связь; da − донорно-акцепторная связь; d − дисперсионное взаимодействие Лондона; i – индукционное взаимодействие; e – электростатическое взаимодействие; p −диполь-дипольное взаимодействие.

Составляющие работы адгезии неодинаковы и зависят от природы сил и условий их взаимодействия.

Если оценивать адгезию, происходящую при контакте жидкости и твердого тела, ее приближенное значение можно определить по формуле Гамакера−Кровела:

$$W_a = -\frac{0{,}6A}{H^2}, \quad (2)$$

где A − константа молекулярного взаимодействия Гамакера; H − толщина взаимодействующего слоя жидкости.

В этом уравнении принимается во внимание молекулярное взаимодействие не только на поверхности, но и внутри контактирующих тел.

Также расчет работы адгезии с участием жидкости может проводиться по следующей формуле (уравнению Юнга-Дюпре):

$$W_a = \sigma_{1,2}(1+\cos\theta). \quad (3)$$

Все величины в этом уравнении могут определяться измерением: и поверхностное натяжение жидкости и величина краевого угла, тогда как межфазные натяжения между жидкостью и поверхностью или поверхностью и газом прямому измерению не поддаются.

Если применить эту формулу к отдельной жидкости, можно определить работу когезии:

$$W_k = 2\sigma_{1,2}, \quad (4)$$

Так как адгезия между краской и запечатываемым материалом является причиной смачивания, можно проследить зависимость между работой адгезии и краевым углом смачивания.

Если краевой угол смачивания равен 0 и соответственно его косинус равен 1, по формуле 3 получаем работу адгезии $W_a = 2\sigma_{1,2} = W_k$.

В этом случае мы получаем адгезию равную когезии жидкости. То есть краска полностью смачивает запечатываемую поверхность (при работе адгезии равной или превышающей работу когезии) [3].

Если краевой угол смачивания равен 90°, его косинус равен 0, соответственно работа адгезии $W_a = \frac{W_k}{2}$. В этом случае краска очень плохо взаимодействует с поверхностью и полностью ее не смачивает.

Если краевой угол смачивания равен 180°, его косинус равен −1, получаем $W_a = 0$, то есть отсутствие смачивания (несмачивание), свидетельствующее о полном отсутствии взаимодействия краски и запечатываемой поверхности. Этот случай крайне редко встречается, потому что между веществами обычно начинается хоть какое-то взаимодействие, пусть даже очень слабое.

Рассматриваемое выше уравнение Юнга-Дюпре выведено для равновесных условий. В печатном процессе эти условия не равновесны, кроме того при печати дополнительно задействовано давление, усиливающее сближение молекул при контакте.

Адгезия взаимодействия печатной краски с поверхностью чаще всего имеет молекулярный характер, но в некоторых случаях образуются и химические связи. Межмолекулярное взаимодействие при контакте краски с запечатываемым материалом или печатными формами приводит к смачиванию краской твердых поверхностей и ее приставанию к ним. В основе этого процесса лежит молекулярная природа взаимодействующих тел.

Если для печати используются пористые или шероховатые бумаги, надо принимать во внимание свойства, которые приобретает бумага из-за структуры своей поверхности и их влияние на смачиваемость бумаги краской [4].

Когда краска попадает на бумагу она начинает одновременно и растекаться по ее поверхности (до образования краевого угла) и впитываться в нее. Растекание краски в начале контакта с бумагой превышает по скорости впитывание, на этом этапе площадь контакта с бумагой больше площади пропитки. Через какое-то время скорости уравниваются и угол смачивание принимает свое максимальное значение. После этого краска все еще продолжает впитываться в поверхность бумаги, но уже не растекается по ней и значение краевого угла смачивания соответственно уменьшается.

На каждый из этих этапов влияют не только свойства красок и бумаг, но также и внешние условия, при которых протекает этот процесс: влажность, температура, давление. Если не учитывать специфику используемых материалов и внешних факторов, при печати может возникнуть проблема «полного смачивания» или «полного несмачивания». Полное смачивание не позволит получить четкость контуров и линий изображения, так как краска растечется на пробельные элементы. Полное несмачивание исключит взаимодействие краски с запечатываемым материалом (происходит скатывание капель), в этом случае даже дополнительное давление печати не сможет обеспечить необходимую площадь контакта краски с бумагой.

Таким образом, при печати краской Rollo Term на газетной бумаге при комнатной температуре косинус краевого угла смачивания будет составлять 0,705, а сам краевой угол составит 45,18 градуса.

Для более плотной офсетной бумаги косинус краевого угла смачивания составит 0,633, при прочих равных условиях и материалах печати (краевой угол при этом 50,75 градуса).

Проведенные эксперименты показали, что использование офсетной краски Exact при печати на газетной (плотностью 45 г/м^2) и офсетной бумаге (плотностью 80 г/м^2) при комнатной температуре получены следующие осредненные результаты: косинус краевого угла смачивания газетной бумаги равен 0,838 при угле 33,05 градуса и косинус краевого угла смачивания офсетной бумаги равен 0,778 при угле 38,95 градуса.

Список литературы

1. Адгезия. [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Адгезия (дата обращения: 02.11.20).

2. Краевой угол смачивания. Закон Юнга [Электрон. ресурс] URL: https://studme.org/253044/matematika_himiya_fizik/kraevoy_ugol_smachivaniya_zakon_yunga (дата обращения: 03.11.20).

3. Адгезия. Когезия. Смачивание и растекание жидкости. [Электронный ресурс] URL: https://studfile.net/preview/3559784/ (дата обращения: 03.11.20).

4. Раскин А.Н., Ромейков И.В., Бирюкова Н.Д., Ефремова А.Н., Муратов Ю.А. Технология печатных процессов: учебник. [Электронный ресурс] URL: http://www.hi-edu.ru/e-books/xbook461/01/Raskin.pdf (дата обращения: 04.11.20).

Соколова Ольга Вячеславовна, магистрант, sokolovalova.lova@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ADHESION PROCESS IN POLYGRAPHY

O.V. Sokolova

Describes the nature of adhesion and the effect it has on the printing process. Methods for assessing the work of adhesion and cohesion are considered. The relationship between the wetting contact angle and the work of adhesion is analyzed.

Key words: printing, process, adhesion, cohesion, contact angle, work of adhesion.

Sokolova Olga Vyacheslavovna, undergraduate, sokolovalova.lova@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

В данном выпуске представлены избранные материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы проектирования и производства систем и комплексов» (20.11.2020).

Конференция была проведена при участии:

- Федерального государственного бюджетного учреждения «Российская академия ракетных и артиллерийских наук»;
- Тульского регионального научного центра РАРАН имени Героя России Н.А. Макаровца;
- Акционерного общества «Конструкторское бюро приборостроения им. академика А.Г. Шипунова»;
- Акционерного общества «Научно-производственное объединение «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева»;
- Акционерного общества «Центральное конструкторское бюро аппаратостроения»;
- Акционерного общества «Акционерная компания «Туламашзавод»;
- Акционерного общества «Тулаточмаш»;
- Общественной организации «Союз научных и инженерных общественных объединений Тульской области».

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева» – спонсор-партнер в рамках программы развития федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет» как регионального опорного университета, а также проектов «Новые кадры ОПК».

Информация размещена на сайте: http://tsu.tula.ru/ivts/partners.

Акционерное общество
«Научно-производственное объединение «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева»

С момента образования в 1945 году на предприятие была возложена задача создания научно-технической базы по разработке гильз для ствольной артиллерии, налаживанию их серийного производства и созданию специализированного оборудования. С конца 50-х годов АО «НПО «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева» приступил к разработке реактивных систем залпового огня (РСЗО) и в 1963 году сдал на вооружение Российской армии систему «Град», которая в настоящее время находится на вооружении в армиях более 50 стран мира. В последующие годы созданы РСЗО «Ураган» и «Смерч», РСЗО для военно-морского флота. К системам разработаны снаряды различного назначения.

Накопленный за полувековую деятельность научно-технический потенциал предприятия позволил эффективно решить задачу конверсионного развития, создавая на базе традиционных военных технологий производство наукоемкой гражданской продукции. Товары производства АО «НПО «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева» поставляются на отечественный и зарубежные рынки и пользуются нарастающим спросом. Сегодня АО «НПО «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева» является головным предприятием дивизиона по разработке реактивных систем залпового огня наземного и морского базирования, входит в контур управления холдинга «Технодинамика» Госкорпорации «Ростех» – управляющей организации АО «НПК «Техмаш».

Ключевые компетенции дивизиона сформированы многолетней практикой разработки и производства средств вооруженной борьбы и определяются сложившейся специализацией предприятий и организаций дивизиона. Ключевые компетенции как совокупность знаний и опыта персонала, накопленного научно-технического задела, производственных возможностей, основных фондов и технологической инфраструктуры связаны с разработкой и производством следующих видов вооружения:

- РСЗО в интересах РВ и А СВ;
- РСЗО береговой артиллерии;
- корабельных комплексов реактивного оружия для поражения надводных береговых целей;
- тяжелых огнеметных систем;
- неуправляемых и корректируемых авиационных ракет;
- комплексов артиллерийского вооружения;
- вооружения легкобронированной техники и танков;
- гильз различного артиллерийского и бронетанкового вооружения, пластмассовых гильз;

- специальных реактивных систем повышенной дальности, точности и эффективности на новых физических принципах;

- средств доставки для противолодочной, противоторпедной защиты; средств доставки инженерных комплексов дистанционного минирования;

- комплексов специального вооружения.

Рожденный в год Великой Победы, в свой юбилей «СПЛАВ» получил один из самых лучших подарков. На Параде-2020, посвященном 75-летию победы Советского народа в Великой Отечественной войне 1941 – 1945 гг., по брусчатке Красной площади в Москве в составе механизированной колонны прошли реактивные системы залпового огня всех поколений – детище конструкторов научно-производственного объединения. Впервые зрителям были представлены новейшие разработки предприятия – РСЗО «Торнадо-С», Инженерная система дистанционного минирования (ИСДМ) и тяжелая огнеметная система «Тосочка».

Информация взята с сайта *http://splav.org*.

Информация размещена на сайте: *http://tsu.tula.ru/ivts/partners/*

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОВЕДЕНИЕ, СИСТЕМЫ ПРИВОДОВ И ДЕТАЛИ МАШИН

Евланов А.А., Степанова Е.В.
Особенности тепломассообменных процессов в области отрывных течений 3

Евланов А.А., Степанова Е.В.
Влияние температуры рабочего тела на параметры рециркуляционных зон 6

Евланов А.А., Дунаев В.А., Сладков В.Ю.
Программный комплекс для определения параметров рабочего процесса в газогенераторах с местными сопротивлениями 9

Патрикова Е.Н., Патрикова Т.С., Лосева А.А.
Математическая модель процесса нелетального выстрела из боевого оружия при использовании вкладного ствола 14

Казаков К.И., Смирнов А.В., Могильников Н.В., Ермаков А.А.
Расчет процесса отделения полезной нагрузки головной части реактивного снаряда 20

Пушкарёв А.М., Вольф И.Г., Ихтисанов И.И.
Исследование теплового состояния стволов оружия и влияния его на начальную скорость снаряда 26

Арсентьева М.В.
Исследование воспламенительной способности конденсированных частиц 31

Баранов В.Л., Смирнов Н.П., Тер-Данилов Р.А.
Продольные волны растягивающих напряжений в моноблочных стволах артиллерийских систем при выстреле 37

Баранов В.Л., Левин А.С.
Динамическое деформирование стержневых элементов амортизаторов стрелкового оружия для следящей нескользящей схемы внешнего нагружения 41

Баранов В.Л., Воротилин М.С., Соловьев А.А., Чибирев Б.О.
Оценка прочности лопасти свертывающегося оперения РСЗО в поле центробежных сил инерции 46

Лахов Д.Р., Никольский В.В., Селивёрстов А.С.
Динамика круглой пули в гладком канале ствола 51

Никольский В.В., Кузин С.И.
Особенности математического моделирования динамики механизмов автоматики с неудерживающими связями 56

Пушкарёв А.М., Здоровцов А.Г.
К вопросу оптимального синтеза систем физической защиты 62

Ветров В.В., Морозов В.В., Федоров А.С.,
Оськин А.С., Чулков Н.С., Шилин П.Д.
Основные конструктивные и проектно-функциональные требования
к воздухозаборным устройствам 66

Зеленко В.К., Нестеренко А.И.
Системы активного гашения звука выстрела 72

Минаков Е.И., Мешкова Е.О.
Анализ методов построения информационно-измерительных
и управляющих систем транспортного обеспечения горных выработок …….. 75

Погорельский С.Л., Понятский В.М.,
Макарецкий Е.А., Гублин А.С., Овчинников А.В.
Программный комплекс для формирования и обработки
гиперспектральных изображений 79

Погорельский С.Л., Макарецкий Е.А.,
Понятский В.М., Овчинников А.В., Гублин А.С., Шилин А.А.
Результаты экспериментального исследования спектров материалов
и сложных фонов 85

Погорельский С.Л., Макарецкий Е.А., Понятский В.М., Шилин А.А.
Исследование алгоритмов выделения фрагментов изображения
на сложном фоне методами гиперспектральной обработки 91

Погорельский С.Л., Макарецкий Е.А., Понятский В.М., Егоров Д.Б.
Исследование эффективности выделения фрагментов изображения
на сложном фоне при обработке RGB-сигналов 97

Погорельский С.Л., Макарецкий Е.А.,
Овчинников А.В., Гублин А.С., Понятский В.М., Шилин А.А.
Разработка многоспектрального программно-технического комплекса
для исследования объектов и фонов 102

Нгуен Суан Чыонг
Двухчастотная схема синхронизации распределенных генераторов
в спутниковых системах 108

Ивахно Н.В., Гладких А.В., Зыкин С.И.
Интеллектуальная система поддержки деятельности
оператора РЛС …..... 114

Подчуфаров Ю.Б., Голюдов П.С., Сафронов Д.В.
Разработка комплексно-моделирующего стенда для отработки специального
программного обеспечения …… 119

Асташов В.С., Грушичев С.Н., Иванов А.С., Поляков А.А.
Направления повышения точности и дальности стрельбы управляемых
реактивных снарядов систем залпового огня ……... 122

Коржук Н.Л., Мельников А.Х., Индюхин А.Ф.
Система диагностики когнитивных нарушений …….. 126

Игнатов А.В., Русин В.В., Стреляев С.И.,
Санникова А.Р., Зыков С.М., Добряков А.В.
Влияние числа коррекций траектории управляемого боеприпаса
на вероятность поражения одиночной цели 133

Заводова Т.Е., Хмельников Е.А., Смагин К.В.
Увеличение разрушающего действия малокалиберных боеприпасов
по легкобронированным целям ……. 138

Чурсин А.А., Сятчихин В.В.
Сущность системы технического диагностирования вооружения
и военной техники …….. 152

Муралев А.А., Корноухов А.Ю.
К вопросу оценки сохраняемости образцов вооружения ……... 155

Сигитов В.В., Ковинько А.И., Романюта Е.А.
Методика определения последовательности выполнения учебных задач
на тренажере ПТРК ……. 159

Полубехин А.И., Петешов А.В., Румянцев В.Л.
Алгоритм обнаружения пространственно-когерентных сигналов
в разнесенной MIMO радиолокационной системе ……. 165

Мамон Ю.И., Курбатский С.А., Карандин Д.Б., Румянцев В.Л.
Оценка влияния параметров канала связи на помехоустойчивость приема
сигнала ……. 172

Акиншин Н.С., Ковинько А.И., Романюта А.Е., Ростовцев И.А.
Модель оценки влияния атмосферных аэрозольных образований
на визуальную обстановку для оператора ПТРК 179

Игнатов А.В., Кондратьев А.Г., Пятницкий Я.С., Исаева Э.С.
Использование методов системного подхода при разработке
комплексов РВ в АО «КБП» …… 183

Мальцев В.А., Майоров Н.В.
Влияние энтропии технического состояния образца
на вероятность выполнения эргатической системой задач 188

Синельников Э.Г., Копейка А.Л., Детенышев Д.Ю.
О возможности использования кумулятивных зарядов
для моделирования высокоскоростного соударения 191

Гончаров П.С., Мартынов В.В., Шуневич Н.А., Цыбин О.Ю.
Использование электромагнитного излучения плазмы электрического ракетного двигателя …….. 197

Денисов А.М., Корнилов А.В., Хубларова Т.С., Бабин А.М.
Исследование влияния космического мусора на функционирование параболических антенн космических аппаратов ……. 203

Житный М.В., Гончаров П.С., Зозуля Л.П., Булекбаева М.Ю.
Программный модуль оценивания взаимного положения космического аппарата и фрагментов космического мусора …….. 208

Шпрехер Д.М., Зеленков А.В.
Управление процессом добычи с адаптацией к разновидностям горной породы …….. 214

Костив В.М., Помигалова Т.Е., Джабаев А.Н., Штин А.С.
Повышение межремонтного ресурса лопаток турбин на основе исследования их напряженно-деформированного состояния …… 218

Котесов А.А., Котесова А.А.
Методика определения параметров закона Фишера – Типпета 2-го порядка для распределения совокупности средневзвешенных напряжений по выборочным данным в интервале нормативных нагрузок …… 225

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Нечепуренко К.Ю.
Автономное определение местоположения малогабаритного беспилотного летательного аппарата ……..... 232

Феофилов С.В., Козырь А.В.
Структурно-параметрический синтез цифровых автоколебательных систем управления ……..…… 242

Феофилов С.В., Феофилов Д.С.
Оптимизация траектории достижения заданной области поиска для беспилотного летательного аппарата 251

Феофилов С.В., Хапкин Д.Л.
Базовый синтез нейросетевых регуляторов для следящих систем управления 256

Макаров Н.Н., Руднев С.А., Плыкина Е.В.
Применение цифрового скользящего режима в следящем приводе …….. 262

Судаков А.А.
Автоматизированный стенд для исследования динамических характеристик бесконтактных двигателей постоянного тока ..…… 268

Горячев О.В., Степочкин А.О.
Особенности применения шагового электродвигателя в системах наведения и стабилизации ……..... 272

Сафонова С.С., Горячев О.В.
Синтез корректирующего алгоритма для высокодинамичного привода системы достабилизации …… 279

Ефромеев А.Г., Черкасова Н.Д.
Разработка программного обеспечения для универсального микропроцессорного блока управления различными типами исполнительных двигателей …….. 285

Шестерняк Л.В.
Методы обработки кадров динамических жестов руки 290

Фролов С.В., Потлов А.Ю., Фролова Т.А.
Моделирование интерференционного сигнала во внутрисосудистом пространстве для систем оптической когерентной томографии …… 294

Агафонов Д.А., Губская О.А., Гурьянов Д.И., Дорошенко Г.П., Кривцов С.П., Милашевский А.В.
Методика прогнозирования технического состояния средств связи сети связи специального назначения ……. 302

Рахимов А.А.
Методика использование математического пакета MAPLE 17 при изучении темы «Производная и ее применение» в курсе высшей математики для студентов технического вуза …… 308

Фролов Д.В., Катюха Р.В.
Способ оценки потенциальных ошибок измерений координат объектов в зависимости от диапазона рабочих волн ……... 313

Агафонов Д.А., Губская О.А., Гурьянов Д.И., Кривцов С.П., Милашевский А.В.
Принципы построения системы обеспечения безопасности и защиты информации в системе управления сетью связи специального назначения ……. 317

Шеянов Д.Ю., Горшков А.А., Ключко Н.Ю.
Оптимизация структуры планарной антенной системы на основе аффинных преобразований ……... 321

Шишкина А.А.
Применение программно-математических комплексов для улучшения условий труда на производстве …… 327

Алешин С.Л.
Методика пространственно-временной обработки и ее реализации в адаптивных антенных решетках …….. 330

Вайцель А.А.
Анализ потерь в трубопроводе с применением программных продуктов …… 336

Милашевский А.В., Мякотин А.В., Привалов А.А., Чеботарев В.И.
Факторы, влияющие на функциональную целостность и устойчивость функционирования подвижного узла связи специального назначения …… 339

Газаров А.Р.
Применение программного обеспечения ANSYS для выявления аэродинамических характеристик зданий …… 344

Абидарова А.А.
Кибератаки на информационные и автоматизированные системы и комплексы …… 347

Колосов Р.А.
Анализ вопросов применения и изготовления металлоконструкций …… 350

Калинин К.А.
Метод анализа аэродинамики зданий с использованием программных комплексов на базе МКЭ …….... 353

Афанасьева Д.В.
Общий анализ современного состояния вредоносного программного обеспечения …… 356

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Баранов В.Л., Желтова О.И., Литус И.Б., Тер-Данилов Р.А., Чванов А.Е., Чупахин А.П.
Оценка влияния фрикционных эффектов опорно-поворотной платформы при визуальном сопровождении высокодинамичных объектов, движущихся по навесным траекториям ……. 359

Зыкин С.И., Ивахно Н.В.
Методика автоматического анализа матрицы состояния дыхательной системы для реализации адаптивного управления ……. 365

Беленова Л.Д., Минина О.В., Прохорцов А.В., Усевич П.С.
Аналитическое определение параметров ориентации подвижного объекта на основе фазового интерферометрического метода 369

Прохорцов А.В., Минина О.В.
Аналитическое определение скорости движения малогабаритных объектов на основе псевдорадиально-скоростного метода 374

Матвеев В.В.
Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором 377

Лихошерст В.В., Рылеев М.Д.
Расчет электромагнитного интерцепторного рулевого привода малогабаритного летательного аппарата ……..... 384

Балабаев О.С., Прохорцов А.В.
Сравнительный анализ методов начальной выставки БИНС на подвижном объекте ...…… 389

Прохорцов А.В., Минина О.В.
Аналитическое решение навигационной задачи на основе
псевдодальномерного метода ……..... 395

Вагин Г.Я., Куликов А.А.,
Севостьянов А.А., Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш.
Методы и средства повышения качества электроэнергии
в распределительных электрических сетях низкого и среднего напряжения …….. 399

Воронин С.Г., Султонов О.О.
Мостовой инвертор как преобразователь напряжения для автономных
трёхфазных сетей малой мощности …….. 408

Сластихин Н.С.
Повышение жесткости механической характеристики в электромеханической
системе с модальным регулятором и учетом динамических показателей …… 416

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Баранов В.Л., Тер-Данилов Р.А.
Моделирование деформационного отклика микрогеометрии сферической
поверхности на импульсное нагружение …….. 421

Октябрьская Л.В., Минчук С.В., Воротилин М.С., Поляков Е.П.
Методика расчета уноса массы композиционного материала элементов
соплового блока 425

Лялин В.М., Сидоров Р.А., Зыков С.М.
Исследование силовых характеристик высокоскоростного холодного
радиального обжатия трубной заготовки из конструкционной
легированной стали ……..... 436

Октябрьская Л.В.
Обеспечение минимума массы соплового блока энергетической установки
заданной конструкции элементов 441

Хаев Т.Э., Айдаров Б.А.
Повышение эффективности организации реставрационных работ
с использованием высокопрочного гипсового материала с полыми
стеклянными микросферами ……..... 445

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Ларин Д.В., Ларин А.В., Бадосов И.С.
Подготовка картографических данных для решения задач комплексов
управляемого вооружения …… 451

Тархов Н.С., Лазуткин Р.П., Тархов А.Н.
Моделирование теплового поля биологической ткани ……... 456

Патрикова Е.Н., Патрикова Т.С.
Особенности организации современного учебного занятия с использованием дистанционных образовательных технологий 463

Островлянчик В.Ю., Кубарев В.А., Игнатенко О.А., Кучик М.М., Галлямова О.Р.
Автоматизированный учебно-производственный комплекс «СКАЛА» …..... 467

Шадрин И.Д., Юдинцев Д.В.
Моделирование ходовой части транспортных средств специального назначения в Siemensimagine.LABLMS 472

Арсентьева М.В.
Вычислительный практикум по дисциплине «Внутренняя баллистика» ...…….. 478

Стреляев С.И., Евланова О.А., Козлов А.С.
Полунатурный физический эксперимент в дисциплине «Теория и практика физического моделирования» ……..... 483

Алешичева Л.И., Дехтяр Д.А., Евланова О.А., Троицкий А.Н.
Использование дистанционных инструментов при курсовом проектировании по техническим специальностям ……..... 485

Мордакин Б.Ю.
Формирование содержания информационной основы деятельности в тренажёре по укладке купола парашютной системы 490

Дружинин А.Л., Жабин И.П.
Применение 3-D моделей объектов вооружения и военной техники при подготовке операторов ПТРК 497

Куц К.В., Жабин А.И., Артюшков В.С.
Применение современных образовательных технологий при проведении практических занятий по эксплуатации стрелково-пушечного вооружения ...……. 501

Мальцев В.А., Майоров Н. В., Колганов А.Г.
Разработка интерактивных учебных материалов для подготовки специалистов по эксплуатации систем и комплексов вооружения …..... 504

Емельянов А.В., Гордеев В.Н., Титов Д.А., Жабин И.П.
К вопросу тренажерного обучения работе со съемным авиационным вооружением ……..... 510

СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ

Полякова М.А., Казанцева Т.В., Казанцева Н.К., Ткачук Г.А.
Использование принципа комплексной стандартизации для определения взаимоувязанных требований к объекту стандартизации …….. 516

МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ПРОЦЕССЫ

Соколова О.В.
Допечатная подготовка во флексографии …… 524

Ямилинец С.Ю.
Расчет деформации растровой точки для автоматизации внесения предыскажений ……... 529

Дьякова Э.В.
Анализ мощности привода бункерного загрузочного устройства с вращающимися захватывающими органами ……. 532

Рожков А.М.
Оценка максимальной производительности одношнекового экструдера при оптимальных режимах его работы ……. 535

Соколова О.В.
Особенности растворителей для флексографских красок …….. 538

Рожкова О.Д.
Экспериментальная оценка свойств крафт-бумаги при упаковывании хлебобулочных изделий ……. 541

Соколова О.В.
Адгезионные процессы в полиграфии …….. 545

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ

ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 11

Редактор О.И. Борискин

Компьютерная правка и верстка – М.С. Шевков, Б.С. Яковлев

Учредитель:
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97
Подписано в печать 10.12.20. Дата выхода в свет 18.12.20.
Формат бумаги 70×100 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 91,16
Тираж 500 экз. Заказ 176
Цена свободная

Адрес редакции и издателя:
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95

Отпечатано в Издательстве ТулГУ
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95