

Министерство образования и науки Российской Федерации

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

ISSN 2071-6168

**ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 11

**Тула
Издательство ТулГУ
2013**

УДК 621.86/87

Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 11. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. 400 с.

Рассматриваются научно-технические проблемы приборостроения, управления качеством, стандартизации и сертификации, электро- и нанотехнологий, информационной безопасности и информационных технологий, транспорта, энергетики, электроснабжения, электроприводов, технологий и оборудования обработки металлов резанием, управления, вычислительной техникой и информационными технологиями, машиностроения и машиноведения, охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов, технологий и оборудования обработки металлов давлением.

Материалы предназначены для научных работников, преподавателей вузов, студентов и аспирантов, специализирующихся в проблематике технических наук.

Редакционный совет

М.В. ГРЯЗЕВ – председатель, **В.Д. КУХАРЬ** – зам. председателя, **В.В. ПРЕЙС** – главный редактор, **А.А. МАЛИКОВ** – отв. секретарь, **И.А. БАТАНИНА**, **О.И. БОРИСКИН**, **В.И. ИВАНОВ**, **Н.М. КАЧУРИН**, **Е.А. ФЕДОРОВА**, **А.К. ТАЛАЛАЕВ**, **В.А. АЛФЕРОВ**, **В.С. КАРПОВ**, **Р.А. КОВАЛЁВ**, **А.Н. ЧУКОВ**

Редакционная коллегия

О.И. Борискин (отв. редактор), А.Н. Карпов (зам. отв. редактора), Р.А. Ковалев (зам. отв. редактора), А.Н. Чуков (зам. отв. редактора), С.П. Судаков (выпускающий редактор), Б.С. Яковлев (отв. секретарь), И.Е. Агуреев, А.Н. Иноземцев, С.Н. Ларин, Е.П. Поляков, В.В. Прейс, А.Э. Соловьев

***Подписной индекс 27851
по Объединённому каталогу «Пресса России»***

«Известия ТулГУ» входят в Перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора наук

© Авторы научных статей, 2013

© Издательство ТулГУ, 2013

*К 15-летию кафедры
«Приборы и биотехнические системы»
тульского государственного университета*

**КАФЕДРА
«ПРИБОРЫ И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ»
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

9 октября 2013 г. исполнилось 15 лет со дня организации в Тульском государственном университете кафедры «Приборы и биотехнические системы» (приказ ректора №691 от 9 октября 1998 г).

Кафедра осуществляет подготовку бакалавров по направлениям:

200100 «Приборостроение», профили «Бортовые приборы управления» и «Информационно-измерительные системы»,

201000 «Биотехнические системы и технологии», профиль подготовки: «Биотехнические и медицинские аппараты и системы»;

На кафедре ведется подготовка магистров по направлению 200100 «Приборостроение» профили «Системы ориентации, стабилизации, навигации» и «Медико-биологические аппараты, системы и комплексы»;

Для желающих продолжить образование открыта аспирантура, где проводится подготовка кандидатов технических наук по научным специальностям (аспирантура):

Информационно – измерительные и управляющие системы,

Военная техника и вооружение,

Приборы, системы и изделия медицинского назначения.

В составе кафедры 12 штатных преподавателей: заведующий кафедрой доктор технических наук, профессор, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, награжденный медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» Савельев В.В., 9 кандидатов технических наук профессор Коржук Н.Л., доценты: Белянская Е.С., Е.С.Богданов М.Б., Ивахно Н.В., Кулешов В.В., Лебеденко И.С., Прохорцов А.В., Смирнов В.А., Тархов Н.С., два кандидата биологических наук: доценты Антоненко С.В., Индюхин А.Ф. К занятиям со студентами привлекаются высококвалифицированные специалисты НИИ и КБ г.Тулы, ряд профессоров и доцентов с родственных кафедр университета. Проведение учебных занятий и научных исследований на кафедре было бы невозможно без той работы, которую добросовестно выполняют заведующий лабораториями Федосов



А.И., инженер Чайка Е.В., старший лаборант Калинина Е.В., ведущий инженер Бородина В.Г. (работала на кафедре до 2010 г.), лаборант Варламов С.И. (работал на кафедре до 2009г.).

Благодаря самоотверженному труду коллектива, уже на пятый год существования кафедра в рейтинге ТулГУ поднялась с одного из последних мест среди 60 кафедр университета на 20 место, и в течение десяти последующих лет продолжает занимать этот уровень. При этом по основным видам деятельности - учебно-методической и научной, кафедра ПБС в среднем в течение последних пяти лет занимает соответственно 9 и 8 место среди всех кафедр университета.

Кафедрой подготовлено 427 инженеров, 71 магистр, 382 бакалавра, 7 кандидатов технических наук; издано 17 учебных пособий с грифом УМО, 5 монографий, 5 сборников научных трудов, только в центральной печати опубликовано 340 статей, получено 63 патента на изобретения. Студентами кафедры получено 3 медали министерства образования и науки РФ, 170 дипломов Всероссийских и Международных конференций, опубликовано 275 статей.

На кафедре ведутся научно-технические работы по следующим направлениям:

- теория и проектирование бесплатформенных инерциальных и инерциально-спутниковых систем ориентации и навигации;

- теория и проектирование систем стабилизации и наведения с расширенными углами обзора;

- разработка теории и принципов построения аппаратуры, воздействующей на дыхательную систему человека;

- динамический анализ электроэнцефалограмм (биотехническая система (БТС) неврологической диагностики; БТС нейроинтерфейса; БТС диагностики бинокулярного зрения; БТС диагностики спортсмена).

В последние 5 лет среднегодовой объем научных работ (в денежном выражении), выполненных сотрудниками кафедры по хоздоговорам, госбюджетным программам и грантам, составил 1254 тыс. руб. (114 тысяч рублей на одного штатного преподавателя в год). В указанный период на кафедре получено 3 гранта РФФИ (Савельев В.В., Прохорцов А.В.); грант губернатора Тульской области (Савельев В.В.); кафедрой (совместно с кафедрой «Электротехника и электрооборудование») выполнена НИР по заданию Секции прикладных проблем при Президиуме РАН (Государственный контракт № 1476 от 7.04.2005 г. в соответствии с постановлением Правительства РФ от 30.12.2004 г.); выполнена НИР, в соответствии с постановлением Правительства РФ от 28.12.2006 №812-37 “О государственном оборонном заказе”; совместно с сотрудниками кафедр ИВТС выполнялись хоздоговорные НИР в интересах ОАО «НПО «СПЛАВ» и по государственному заказу Министерства образования и науки РФ. Высокий уровень научных исследований сотрудников кафедры подтверждается

большим количеством наград.

Только за последние 5 лет четверо сотрудников (Ивахно Н.В., Индюхин А.Ф., Коржук Н.Л., Тархов Н.С.) были награждены премией Мосина С.И.; доцент кафедры (Прохорцов А.В.) получил диплом лауреата регионального конкурса в номинации «Изобретатель года-2010», занял I место в выставке научно-технического творчества молодежи Тульской области, получил именную премию им. Б.М. Подчуфарова в области приборостроения и систем управления, занял второе место в юбилейном X городском конкурсе профессионального мастерства молодёжи «Тульские мастера», получил звание «Лучший молодой преподаватель Тульского государственного университета», стал обладателем стипендии Президента России молодым ученым и аспирантам по направлению «Космические технологии, связанные с телекоммуникациями, включая и ГЛОНАСС, и программу развития наземной инфраструктуры»; двое сотрудников кафедры (Тархов Н.С., Коржук Н.Л.) отмечены знаком РНТОРЭС им. А.С. Попова «За заслуги в развитии радиоэлектроники и связи»; доцент кафедры (Тархов Н.С.) стал победителем Всероссийского и регионального конкурсов «Инженер года», обладателем премии им. К.Д. Ушинского, получил звания Почетный радист РФ и Ветеран труда; пятеро сотрудников кафедры (Коржук Н.Л., Кулешов В.В., Лебеденко И.С., Савельев В.В., Тархов Н.С.) отмечены медалью «300 лет оружейному производству в Туле», аспирант кафедры (Дорохин М.А.) занял III место в выставке научно-технического творчества молодежи Тульской области, доцент кафедры (Богданов М.Б.) выиграл грант Благотворительного фонда В. Потанина; заведующему кафедрой (Савельеву В.В.) присвоена общественная награда Союза научных и инженерных общественных объединений Тульской области «Знак почета». Результаты работы кафедры неоднократно (более 15 раз) освещались в центральных и региональных СМИ

Кафедра проводит курсы повышения квалификации по программе «Техническое обслуживание медицинской техники» для сотрудников профильных организаций Тулы и других городов. За время существования кафедры переподготовку прошли более 30 человек.

Четыре сотрудника кафедры являются членами Международной общественной организации «Академия навигации и управления движением»: В.В. Савельев, М.Б. Богданов, А.В. Прохорцов, В.А. Смирнов., а Тархов Н.С. является членом общественной организации Академия инженерных наук им А.М. Прохорова.

Ежегодно аспиранты и магистранты кафедры выезжают на конференции молодых ученых по приглашению международной общественной организации «Академия навигации и управления движением» (г. Санкт-Петербург), Рязанской государственной радиотехнической академии (Всероссийские конференции по биотехническим системам), Саратовского государственного технического университета (Всероссийская конференция

«Актуальные вопросы биомедицинской инженерии»), Международного университета «Дубна» (научно-техническая школа «Кадры будущего»).

Помимо учебной и научной деятельности сотрудники кафедры выполняют и воспитательную и организационную работу, так Антоненко С.В. является ответственной за профориентационную работу, за научно-исследовательскую работу, за интернет страничку кафедры, куратор студентов 1 и 2 курсов; Белянская Е.С. заместитель заведующего кафедрой по учебно-методической работе, ответственная за систему менеджмента качества на кафедре, куратор студентов 3 курса; Богданов М.Б. - ответственный за технические состояние компьютерного парка, Индюхин А.Ф. - ответственный за работу со студентами проживающими в общежитии, за трудоустройство выпускников, куратор студентов 1 и 2 курсов; Коржук Н.Л. - куратор направления «Биотехнические системы и технологии», организатор практик студентов; Кулешов В.В. - ответственный за научно-исследовательскую работу, куратор студентов 4 и 5 курсов; Прохорцов А.В. является заместителем заведующего кафедрой; Смирнов В.А. - куратор направления «Приборостроение»; Тархов Н.С. заместитель заведующего кафедрой по воспитательной работе, ответственный за нормоконтроль на кафедре, куратор студентов 1 и 2 курсов.

В дополнение к работе на кафедре сотрудники кафедры выполняют большую работу на уровне факультета (Н.С. Тархов – заместитель декана факультета САУ) и университета (Н.Л. Коржук – начальник отдела по приему и работе со студентами, обучающимися на местах с оплатой стоимости обучения).

Успешной работе кафедры способствует ее сотрудничество с рядом предприятий, организаций, институтов, кафедр: НИУ ИТМО (г. С-Петербург), Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, ОАО «концерн «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР» (г. С-Петербург), КНИТУ им. А.Н. Туполева (г. Казань), ОАО АНПП «Темп-Авиа» (г. Арзамас), НИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва), Институт инженерной физики (г. Серпухов), ОАО «Айсенс» (г.Москва), ВНИИФ РФЯЦ (г. Саров), ОАО «Государственное машиностроительное конструкторское бюро «Радуга» им. А.Я. Березняка», ОАО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро», ТФ НПК КБ «Машиностроения» (г. Коломна), Филиал ФГУП «Научно-производственный центр автоматики и приборостроения имени академика Пилюгина Н.А» - «Со-сенский приборостроительный завод», ОАО КБ «Приборостроения», ОАО «НПО «Сплав», Производственное объединение «Туламашзавод», ОАО «НПО Стрела», ОАО ОКБ «Октава», ГУП ТО «Миссия», ОАО НПП «Альфа-прибор», ЗАО «Перун», ЗАО ПК «Медтехника», Филиал ОАО-«ЦКИБ ССО».

Выпускники кафедры пользуются высоким спросом на предприятиях г. Тулы, Москвы, Московской области и других регионов России (в том

числе и на перечисленных выше предприятиях). Предприятия-работодатели гарантируют выпускникам стабильную достойную зарплату, профессиональный рост, помощь в решении жилищно-бытовых проблем, социальную защищенность.

Дальнейшая работа кафедры ПБС видится в повышении качества подготовки бакалавров и магистров путем совершенствования содержания учебного материала, создания новых учебных пособий (в том числе электронных), проведения НИР по указанным выше тематикам, повышении квалификации преподавателей при подготовке и защите ими докторских диссертаций.

*д-р техн. наук, проф., зав. каф. ПБС,
В.В. Савельев*

УДК 681.2

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВЫЧИСЛЕНИЯ
УГЛОВЫХ И ЛИНЕЙНЫХ КООРДИНАТ
МАЛОГАБАРИТНОГО УПРАВЛЯЕМОГО
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С МАЛЫМ ВРЕМЕНЕМ ПОЛЕТА,
ДВИГАЮЩЕГОСЯ В НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД
ПО БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ТРАЕКТОРИИ**

М.Б. Богданов, В.В. Савельев

В статье приведены математические выражения, положенные в основу алгоритмического обеспечения функционирования бесплатформенной инерциальной навигационной системы. Указанная система применяется на борту малогабаритного управляемого летательного аппарата с малым временем полета, двигающегося на начальном этапе по баллистической траектории.

Ключевые слова: бесплатформенная инерциальная навигационная система, математическая модель, параметры ориентации и навигации.

Управление полетом малогабаритного летательного аппарата (МЛА) осуществляется системой управления, в состав которой входит навигационная система (НС), позволяющая во время движения определять угловые и линейные координаты МЛА относительно выбранной за базовую систему координат (СК), а также параметры его движения (угловые и линейные скорости и ускорения). Информационным ядром НС является бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС) [21], состоящая из трех датчиков угловой скорости (ДУС), трех акселерометров (АКС) и вычислительного устройства. Первые измеряют проекции вектора скорости вращения на оси связанной с ЛА СК, вторые – вектора кажущегося линейного ускорения на те же оси. В вычислительном устройстве производится обработка сигналов датчиков и вычисление требуемых координат и параметров движения ЛА.

Задаче построения НС для аппаратов, движущихся по баллистической траектории, посвящены работы [10, 20 и др.], однако, «перенос» готовых решений в БИНС малогабаритного объекта нерационален, т.к. приводит к увеличению стоимости НС и её габаритов, а также не позволяет добиться требуемой точности определения координат в характерных условиях эксплуатации. Грамотно проработанная математическая модель процесса вычисления параметров ориентации и навигации является компромис-

сом между затратами вычислительных ресурсов и требуемой точностью вычислений. Такая модель позволяет значительно уменьшить влияние погрешностей ДУС и АКС на точность вычисления координат, обосновать требования к структуре БИНС, к её вычислительному устройству и устройствам преобразования сигналов. В связи с изложенным, логичным является тот факт, что стоимость разработки математической модели превышает стоимость вычислительного устройства [13], в котором её предполагается реализовывать в виде программного обеспечения.

Целью статьи является разработка математической модели процесса вычисления угловых и линейных координат, учитывающей особенности эксплуатации БИНС на борту малогабаритного управляемого летательного аппарата с малым временем полета, двигающегося в начальный период по баллистической траектории.

Адекватность предлагаемой математической модели подтверждена экспериментальным путем. По предлагаемой модели разработано алгоритмическое и программное обеспечение для БИНС, чувствительным элементом которой является малогабаритный микромеханический инерциальный измерительный блок АИСТ-350Т [22] (далее по тексту экспериментальная БИНС).

Параметры Земли и системы координат.

Так как решение задач ориентации и навигации происходит относительно Земной поверхности, то необходимо определиться с её моделью. В соответствии с документами [19] воспользуемся параметрами общеземного эллипсоида (ОЗЭ) ПЗ-90.02 [9]: большая полуось $a = 6378136$ м, сжатие $\alpha = 1/298,25784$, квадрат первого эксцентриситета $e^2 = 2\alpha - \alpha^2 \approx 0,006694366$, малая полуось $b = a - \alpha \cdot a \approx 6356751$ м. Также необходимо знать величину ускорения свободного падения на экваторе $g_e = 9,7803284$ м/с² и угловую скорость вращения Земли $\Omega = 7,292115 \cdot 10^{-5}$ рад/с. Числовые значения взяты из [8].

С общеземным эллипсоидом связана одноименная геоцентрическая СК ПЗ-90.02 $O_{ПЗ}X_{ПЗ}Y_{ПЗ}Z_{ПЗ}$ (рис. 1), начало $O_{ПЗ}$ которой находится в центре Земли, ось $O_{ПЗ}Z_{ПЗ}$ направлена вдоль оси суточного вращения Земли к северному полюсу, ось $O_{ПЗ}X_{ПЗ}$ лежит в плоскости экватора и направлена так, что плоскость $X_{ПЗ}O_{ПЗ}Z_{ПЗ}$ совпадает с плоскостью Гринвичского меридиана, а ось $O_{ПЗ}Y_{ПЗ}$ перпендикулярна осям $O_{ПЗ}X_{ПЗ}$ и $O_{ПЗ}Z_{ПЗ}$ и дополняет их до правой СК.

Положение МЛА в СК $O_{ПЗ}X_{ПЗ}Y_{ПЗ}Z_{ПЗ}$ задается углами долготы λ , географической широты φ и высотой H над средним уровнем успокоенного моря. За базовую систему координат (рис. 2 и рис. 3), относительно которой вычисляются углы рыскания, тангажа и крена, примем горизон-

тальную географическую СК $OX_gY_gZ_g$, начало O которой совмещено с центром масс МЛА, ось OX_g направлена по касательной к меридиану на Север, ось OY_g по линии местной вертикали вверх, а ось OZ_g по касательной к параллели на восток. Стартовая система координат $OX_{гпс}Y_{гпс}Z_{гпс}$ развернута относительно базовой СК $OX_gY_gZ_g$ на начальный угол курса $\Psi(0)$. По осям симметрии МЛА направлены оси связанной СК $OX_cY_cZ_c$, начало которой помещено в центр масс и совпадает с началом горизонтальной географической СК $OX_gY_gZ_g$, ось OX_c направлена по продольной оси, ось OY_c – по нормальной оси, а ось OZ_c – перпендикулярна осям OX_c и OY_c так, что дополняет их до правой СК (рис. 2). На рис. 2 показана ориентация МЛА, заданная четырьмя углами: углом курса Ψ , рыскания ψ , тангажа ϑ и крена γ . По сложившейся традиции угол курса откладывается от направления на Север по часовой стрелке. Угол рыскания характеризует отклонение МЛА от плоскости баллистического участка траектории и отсчитывается в той же плоскости, что и угол курса, но положительным направлением является отклонение против часовой стрелки. БИНС расположена в носовой части МЛА (рис. 3), на расстоянии d_0 от центра масс. Оси чувствительности ДУС и АКС направлены вдоль осей OX_c и осей Y_6 и Z_6 параллельных осям связанной СК.

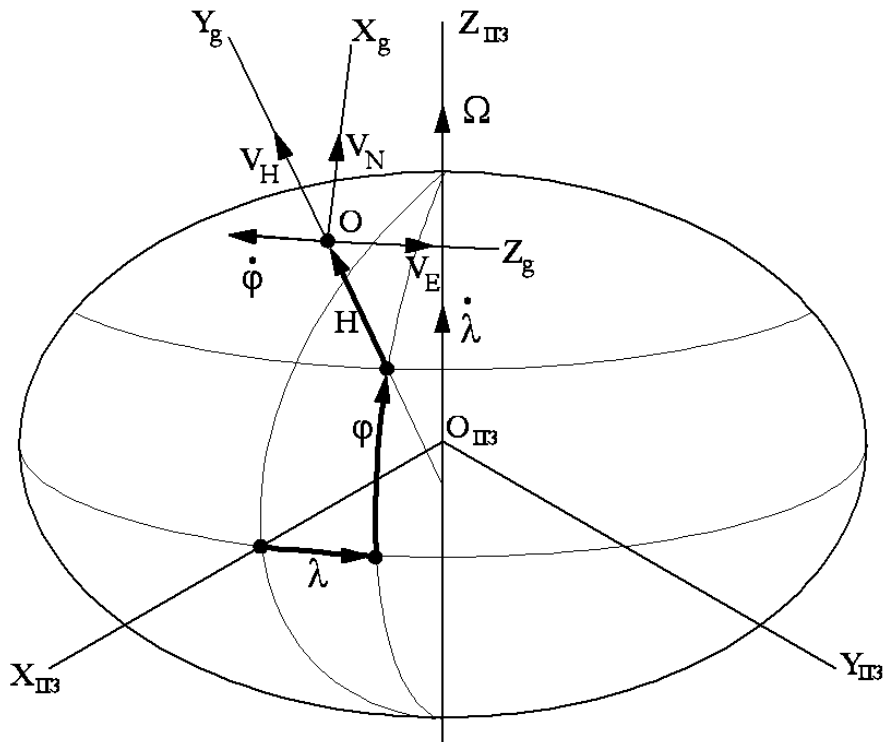


Рис. 1. К пояснению систем координат $O_{пз}X_{пз}Y_{пз}Z_{пз}$ и $OX_gY_gZ_g$

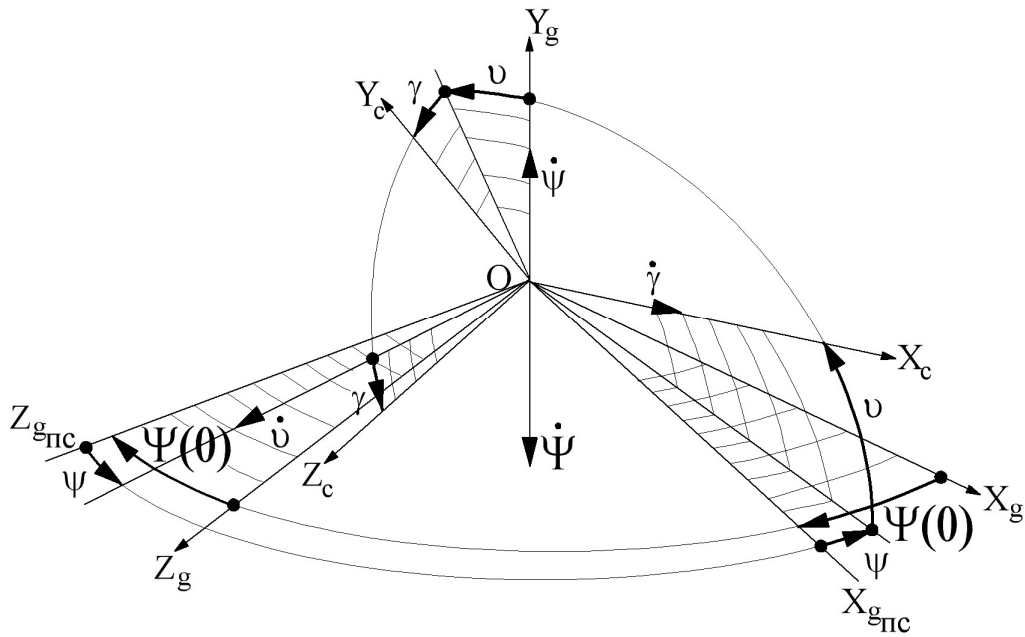


Рис. 2. К пояснению систем координат $OX_{g_{nc}}Y_gZ_{g_{nc}}$ и $OX_cY_cZ_c$, а также углового положения относительно плоскости горизонта и направления на Север

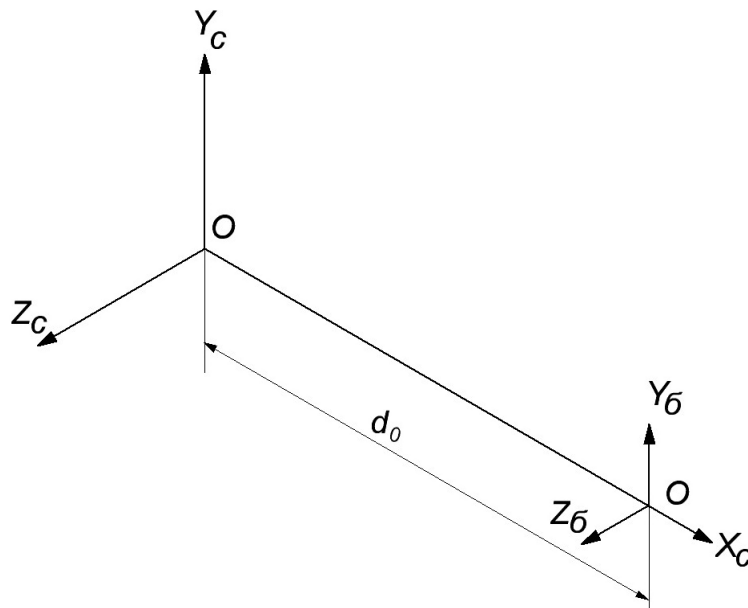


Рис. 3. К пояснению места расположения БИНС в носовой части МЛА

Схема прохождения основных сигналов в БИНС. На рис. 4 показана схема вычислений угловых и линейных координат по исходным данным и сигналам ДУС и АКС.

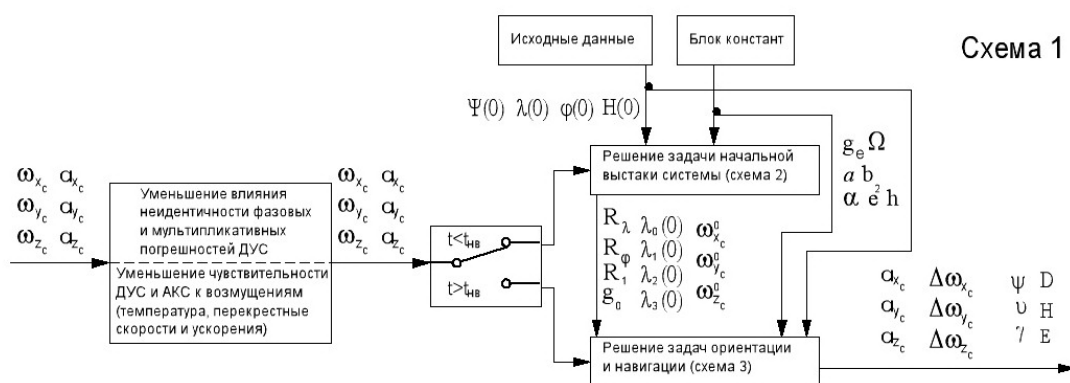


Рис. 4. Схема процесса вычислений координат в БИНС МЛА:

$\omega_{x_c}, \omega_{y_c}, \omega_{z_c}, a_{x_c}, a_{y_c}, a_{z_c}$ - сигналы ДУС и АКС, $t_{нв}$ - время, требуемое для решения задачи начальной выставки, $\Psi(0), \phi(0), \lambda(0)$ и $H(0)$ - начальные значения угла курса, широты, долготы и высоты над уровнем моря, h - шаг интегрирования, равен такту получения сигналов от ДУС и АКС, R_λ - радиус кривизны нормального к ОЗЭ сечения, касательного параллели, R_ϕ - радиус кривизны меридиального сечения ОЗЭ, R_1 и R_2^2 - вспомогательные величины, характеризующие кривизну ОЗЭ, g_0 - ускорение нормальной силы тяжести для ОЗЭ, $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ - параметры Родрига-Гамильтона (элементы кватерниона), $\omega_{x_c}^0, \omega_{y_c}^0, \omega_{z_c}^0$ - нулевые сигналы ДУС, $\Delta\omega_{x_c}, \Delta\omega_{y_c}, \Delta\omega_{z_c}$ - сигналы ДУС после устранения из них нулевых сигналов, ψ, υ, γ - рысканье, тангаж и крен, D, H, E - координаты МЛА в стартовой СК (дальность, высота, боковое отклонение)

Применяемые в БИНС ДУС и АКС в большей или меньшей степени чувствительны к внешним возмущениям, таким как, температура и перекрестные угловые скорости и линейные ускорения. Более того, ДУС чувствительны к ускорениям, действующим вдоль измерительной оси, а АКС – к угловым скоростям. Методика анализа указанного влияния, а также математическая модель метода его уменьшения изложены в статье [3]. Сам метод защищен патентами РФ на изобретение [14 и 15]. Первый патент применим если используются двухстепенные гиротаксометры, второй – без ограничений на принцип функционирования ДУС и АКС.

Многие осесимметричные МЛА совершают во время полета угловые колебания по углам рыскания и тангажа с равными или близкими частотами. Анализ влияния таких колебаний на точность БИНС [4] выявил

значительный дрейф в определении угловых координат (сотни градусов в час). Есть два пути уменьшения дрейфа. Первый, подбор ДУС, мультипликативные и фазовые погрешности которых удовлетворяют определенным условиям [4], либо калибровка имеющихся ДУС по специальной методике [5]. Второй, применение схмотехнических решений, позволяющих выровнять фазовые сдвиги в ДУС [16] и уменьшить влияние неидентичности мультипликативных погрешностей на точность БИНС [17].

После уменьшения указанных выше погрешностей, сигналы ДУС и АКС поступают в блок решения задачи начальной выставки, который позволяет определить матрицу начальной ориентации, записанную через элементы кватерниона $(\lambda_0(0), \lambda_1(0), \lambda_2(0), \lambda_3(0))$, нулевые сигналы ДУС $\omega_{x_c}^0, \omega_{y_c}^0, \omega_{z_c}^0$, величину ускорения нормальной силы тяжести для ОЗЭ (g_0) и вспомогательные величины R_λ, R_ϕ и R_l , характеризующие радиусы кривизны указанного эллипсоида. Исходные данные вводятся в вычислитель в процессе предстартовой подготовки: начальный угол курса $\Psi(0)$, начальные широта, долгота и высота места старта над уровнем моря $\phi(0), \lambda(0)$ и $H(0)$. К величине времени $t_{нв}$ предъявляются противоречивые требования. С одной стороны, оно должно быть как можно меньше, так как определяет время готовности всей системы к работе. С другой стороны, в течение $t_{нв}$ определяются нулевые сигналы ДУС и начальные углы крена и тангажа, а для этого необходимо осреднение сигналов на большом промежутке времени. Опыт показывает, что при проектировании БИНС найти оптимальное значение $t_{нв}$ помогает вариация Алана сигналов АКС и ДУС [12]. Например, для экспериментальной БИНС $t_{нв} = 20$ с.

По истечении времени $t_{нв}$ сигналы ДУС и АКС начинают подаваться в блок решения задач ориентации и навигации, туда же подаются результаты решения задачи начальной выставки. С этого момента может производиться старт и полет МЛА. Во время движения выходные сигналы БИНС передаются в систему управления полетом: проекции абсолютной угловой скорости вращения МЛА на оси связанной СК $\Delta\omega_{x_c}, \Delta\omega_{y_c}, \Delta\omega_{z_c}$, проекции линейного ускорения на оси связанной СК a_{x_c}, a_{y_c} и a_{z_c} , вычисленные углы рысканья ψ , тангажа ν и крена γ , а также координаты движения МЛА в стартовой системе координат D, H и E (дальность, высота и боковое отклонение соответственно).

Математическая модель решения задачи начальной выставки системы.

На рис. 5 показана схема решения задачи начальной выставки.

Радиусы кривизны ОЗЭ, проекции угловой скорости вращения Земли на оси базовой и связанной СК вычисляются по известным формулам

[1, 11]:

$$R_\lambda = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi(0)}}; R_\varphi = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi(0))^{3/2}};$$

$$R_1 = \sqrt{\frac{a^2(1 - e^2)}{\sin^2 \varphi(0) + (1 - e^2)\cos^2 \varphi(0)}}; R_2^2 = R_1^2 + H(0)^2 + 2R_1H(0); \quad (1)$$

$$\Omega_{X_g} = \Omega \cos \varphi(0); \Omega_{Y_g} = \Omega \sin \varphi(0); \Omega_{Z_g} = 0;$$

$$\Omega_{X_c} = \Omega_{X_g} (\lambda_0^2(0) - \lambda_1^2(0) + \lambda_2^2(0) - \lambda_3^2(0)) + 2\Omega_{Y_g} (\lambda_0(0)\lambda_1(0) + \lambda_3(0)\lambda_2(0));$$

$$\Omega_{Y_c} = 2\Omega_{X_g} (\lambda_3(0)\lambda_2(0) - \lambda_0(0)\lambda_1(0)) + \Omega_{Y_g} (\lambda_0^2(0) - \lambda_1^2(0) - \lambda_2^2(0) + \lambda_3^2(0));$$

$$\Omega_{Z_c} = 2\Omega_{X_g} (\lambda_1(0)\lambda_2(0) + \lambda_0(0)\lambda_3(0)) + 2\Omega_{Y_g} (\lambda_1(0)\lambda_3(0) - \lambda_0(0)\lambda_2(0)). \quad (2)$$

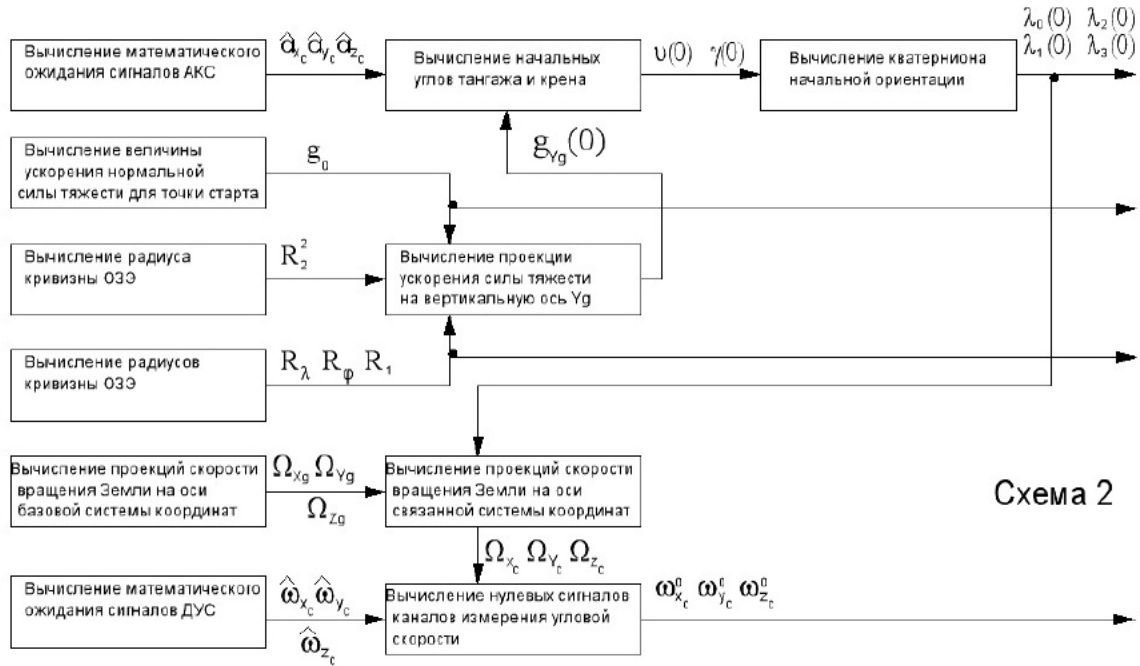


Схема 2

Рис. 5. Схема решения задачи начальной выставки:

$\hat{a}_{x_c}, \hat{a}_{y_c}, \hat{a}_{z_c}, \hat{\omega}_{x_c}, \hat{\omega}_{y_c}, \hat{\omega}_{z_c}$ - математическое ожидание сигналов АКС и ДУС, $\Omega_{X_g}, \Omega_{Y_g}, \Omega_{Z_g}, \Omega_{X_c}, \Omega_{Y_c}, \Omega_{Z_c}$ - проекции угловой скорости вращения Земли на оси базовой и связанной СК, g_{Y_g} - проекция ускорения свободного падения на вертикальную ось базовой СК

Проекция ускорения свободного падения на вертикальную ось базовой СК вычисляется по формуле [11]:

$$g_{Y_g}(0) = g_0 \frac{R_1^2}{R_2^2} - \Omega^2 \cos \varphi(0) \cdot \left[H(0) \cos \varphi(0) + R_1 \cos(\varphi(0)) \cdot \left(1 - \frac{R_1^2}{R_2^2} \right) \right], \quad (3)$$

где ускорение нормальной силы тяжести вычисляется по формуле, коэффициенты которой найдены для ОЗЭ ПЗ-90.02 [2]:

$$g_0 = g_e \cdot \left(1 + 0,0053024 \cdot \sin^2 \varphi(0) - 0,0000059 \cdot \sin^2(2\varphi(0)) \right).$$

Нулевые сигналы ДУС вычисляются по выражениям:

$$\omega_{x_c}^0 = \hat{\omega}_{x_c} - \Omega_{X_c}; \quad \omega_{y_c}^0 = \hat{\omega}_{y_c} - \Omega_{Y_c}; \quad \omega_{z_c}^0 = \hat{\omega}_{z_c} - \Omega_{Z_c}.$$

Начальные углы тангажа и крена находятся по осредненным сигналам АКС:

$$\nu(0) = \arcsin\left(\frac{\hat{a}_{x_c}}{g_{Y_g}(0)}\right); \quad \gamma(0) = \arctan\left(-\frac{\hat{a}_{z_c}}{\hat{a}_{y_c}}\right).$$

Затем полученные углы используются для расчета элементов кватерниона начальной ориентации [6]:

$$\lambda_0(0) = \cos \frac{\Psi(0)}{2} \cos \frac{\nu(0)}{2} \cos \frac{\gamma(0)}{2} - \sin \frac{\Psi(0)}{2} \sin \frac{\nu(0)}{2} \sin \frac{\gamma(0)}{2};$$

$$\lambda_1(0) = \cos \frac{\Psi(0)}{2} \sin \frac{\nu(0)}{2} \cos \frac{\gamma(0)}{2} - \sin \frac{\Psi(0)}{2} \cos \frac{\nu(0)}{2} \sin \frac{\gamma(0)}{2};$$

$$\lambda_2(0) = \cos \frac{\Psi(0)}{2} \cos \frac{\nu(0)}{2} \sin \frac{\gamma(0)}{2} + \sin \frac{\Psi(0)}{2} \sin \frac{\nu(0)}{2} \cos \frac{\gamma(0)}{2};$$

$$\lambda_3(0) = \cos \frac{\Psi(0)}{2} \sin \frac{\nu(0)}{2} \sin \frac{\gamma(0)}{2} + \sin \frac{\Psi(0)}{2} \cos \frac{\nu(0)}{2} \cos \frac{\gamma(0)}{2}.$$

Особенностью предлагаемой модели процесса начальной выставки является то, что, во-первых, учтены параметры ОЗЭ ПЗ-90.02, а, во-вторых, радиусы кривизны ОЗЭ R_λ , R_φ и R_1 рассчитываются для точки старта и используются затем в основном алгоритме решения задачи навигации. Это позволяет снизить вычислительные затраты при сохранении требуемой точности определения координат.

На рис. 6 показана вероятность дрейфа экспериментальной БИНС в вычислении углов.

Видно, что использование информации о вычисленных в процессе начальной выставки нулевых сигналов ДУС позволяет значительно снизить погрешности БИНС: математическое ожидание погрешности в вычислении углов снижается в три раза (с $60^\circ/\text{ч}$ до $20^\circ/\text{ч}$). Причиной оставшейся ошибки является нестабильность нулевых сигналов ДУС в запуске.

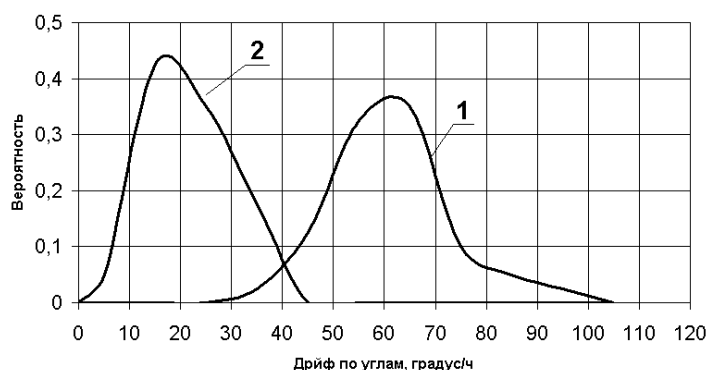


Рис. 6. Вероятность погрешности БИНС в вычислении углов:
1 – без вычисления и устранения нулевых сигналов ДУС,
2 – с вычислением и устранением нулевых сигналов ДУС

Проведенные экспериментальные исследования в широком диапазоне изменения высоты, широты и долготы показали, что погрешность вычисления начальных углов тангажа и крена по предлагаемой модели не превышает величины $0,2^{\circ}$.

Математическая модель решение задач ориентации и навигации. На рис. 7 показана схема решения задач ориентации и навигации. Устранение нулевых сигналов ДУС и вычисление проекций угловой скорости вращения Земли на оси базовой СК производится по выражениям:

$$\Delta\omega_{x_c} = \omega_{x_c} - \omega_{x_c}^0; \Delta\omega_{y_c} = \omega_{y_c} - \omega_{y_c}^0; \Delta\omega_{z_c} = \omega_{z_c} - \omega_{z_c}^0;$$

$$\Omega_{X_g} = (\Omega + \dot{\lambda}) \cdot \cos \varphi; \Omega_{Y_g} = (\Omega + \dot{\lambda}) \cdot \sin \varphi; \Omega_{Z_g} = -\dot{\varphi},$$

где проекций угловой скорости вращения Земли на оси связанной СК вычисляются по выражениям (2) с заменой элементов начального кватерниона $\lambda_i(0)$ $i = 0,1,2,3$ на элементы кватерниона λ_i , рассчитанного для текущего момента времени полета:

$$\lambda_0 = \lambda_0(0) + \frac{1}{2} \cdot \int_0^t (-\lambda_1(\Delta\omega_{z_c} - \Omega_Z) - \lambda_2(\Delta\omega_{x_c} - \Omega_X) - \lambda_3(\Delta\omega_{y_c} - \Omega_Y)) dt;$$

$$\lambda_1 = \lambda_1(0) + \frac{1}{2} \cdot \int_0^t (\lambda_0(\Delta\omega_{z_c} - \Omega_Z) + \lambda_2(\Delta\omega_{y_c} - \Omega_Y) - \lambda_3(\Delta\omega_{x_c} - \Omega_X)) dt;$$

$$\lambda_2 = \lambda_2(0) + \frac{1}{2} \cdot \int_0^t (\lambda_0(\Delta\omega_{x_c} - \Omega_X) + \lambda_3(\Delta\omega_{z_c} - \Omega_Z) - \lambda_1(\Delta\omega_{y_c} - \Omega_Y)) dt;$$

$$\lambda_3 = \lambda_3(0) + \frac{1}{2} \cdot \int_0^t (\lambda_0(\Delta\omega_{y_c} - \Omega_Y) + \lambda_1(\Delta\omega_{x_c} - \Omega_X) - \lambda_2(\Delta\omega_{z_c} - \Omega_Z)) dt.$$

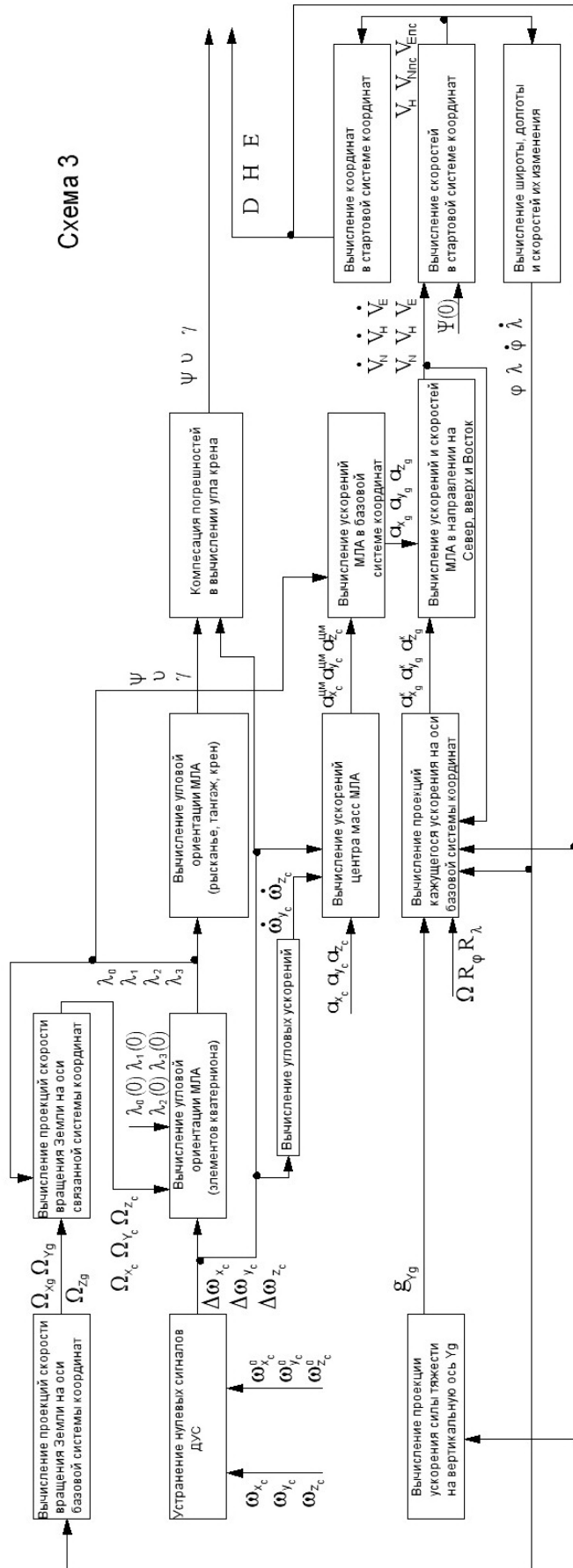


Рис. 7. Схема решения задач ориентации и навигации:

$a_{x_c}^{цм}, a_{y_c}^{цм}, a_{z_c}^{цм}, a_{X_g}, a_{Y_g}, a_{Z_g}$ - проекции линейного ускорения центра масс МЛА на оси связанной и базовой СК, $a_{X_g}^K, a_{Y_g}^K, a_{Z_g}^K$ - проекции «вредного» ускорения на оси базовой СК, $\dot{V}_N, \dot{V}_H, \dot{V}_E, V_N, V_H, V_E$ - ускорения и скорости центра масс МЛА в направлении на Север, вертикаль и Восток, V_{Nnc}, V_{Enc} - проекции линейной скорости МЛА на оси стартовой СК

Приведенные уравнения интегрируются численным методом Пикара, так называемым, одношаговым модифицированным методом Эйлера третьего порядка точности [6] с последующим нормированием.

Углы курса, тангажа, крена и рысканья вычисляются по выражениям, позволяющим определять курс и крен в диапазоне $\pm 180^\circ$, а тангаж $\pm 90^\circ$:

$$\Psi = 2 \arctg \left[\frac{\lambda_0 \lambda_3 - \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_0^2 + \lambda_2^2 - \frac{1}{2} + K_\lambda} \right]; \quad \nu = \arcsin[2(\lambda_2 \lambda_3 + \lambda_0 \lambda_1)];$$

$$\gamma = 2 \arctg \left[\frac{\lambda_0 \lambda_2 - \lambda_1 \lambda_3}{\lambda_0^2 + \lambda_3^2 - \frac{1}{2} + K_\lambda} \right]; \quad \psi = \Psi - \Psi(0),$$

где вспомогательный коэффициент $K_\lambda = \sqrt{\frac{1}{4} - (\lambda_2 \lambda_3 + \lambda_0 \lambda_1)^2}$.

Так как АКС стоят не в центре масс, вокруг которого происходят угловые колебания МЛА, а в его носовой части (рис. 3), то показания АКС пересчитываются в ускорения центра масс МЛА $a_{x_c}^{uM}$, $a_{y_c}^{uM}$, $a_{z_c}^{uM}$ по выражениям:

$$\begin{aligned} a_{x_c}^{uM} &= a_{x_c} + d_0 \left((\Delta \omega_{y_c} - \Omega_Y)^2 + (\Delta \omega_{z_c} - \Omega_Z)^2 \right); \\ a_{y_c}^{uM} &= a_{y_c} - d_0 \left(\dot{\omega}_{z_c} + (\Delta \omega_{x_c} - \Omega_X) \cdot (\Delta \omega_{y_c} - \Omega_Y) \right); \\ a_{z_c}^{uM} &= a_{z_c} + d_0 \left(\dot{\omega}_{y_c} - (\Delta \omega_{x_c} - \Omega_X) \cdot (\Delta \omega_{z_c} - \Omega_Z) \right), \end{aligned}$$

где угловые ускорения $\dot{\omega}_{z_c}$ и $\dot{\omega}_{y_c}$ получаются путем численного дифференцирования соответствующих угловых скоростей. Так как численное дифференцирование приводит к появлению значительной шумовой составляющей в сигналах об ускорении, то сигналы $\dot{\omega}_{y_c}$ и $\dot{\omega}_{z_c}$ фильтруются цифровым фильтром, тип и параметры которого подбираются при проектировании БИНС.

Ускорения центра масс МЛА в базовой СК a_{X_g} , a_{Y_g} , a_{Z_g} вычисляются на основе данных об угловой ориентации:

$$\begin{aligned} a_{X_g} &= a_{x_c}^{uM} (\lambda_0^2 - \lambda_1^2 + \lambda_2^2 - \lambda_3^2) + 2a_{y_c}^{uM} (\lambda_2 \lambda_3 - \lambda_0 \lambda_1) + 2a_{z_c}^{uM} (\lambda_2 \lambda_1 + \lambda_0 \lambda_3); \\ a_{Y_g} &= 2a_{x_c}^{uM} (\lambda_3 \lambda_2 + \lambda_0 \lambda_1) + a_{y_c}^{uM} (\lambda_0^2 - \lambda_1^2 - \lambda_2^2 + \lambda_3^2) + 2a_{z_c}^{uM} (\lambda_3 \lambda_1 - \lambda_0 \lambda_2); \\ a_{Z_g} &= 2a_{x_c}^{uM} (\lambda_1 \lambda_2 - \lambda_0 \lambda_3) + 2a_{y_c}^{uM} (\lambda_1 \lambda_3 + \lambda_0 \lambda_2) + a_{z_c}^{uM} (\lambda_0^2 + \lambda_1^2 - \lambda_2^2 - \lambda_3^2) \end{aligned}$$

Показания акселерометров соответствуют кажущимся ускорениям,

содержащим ускорение центра масс МЛА и так называемые «вредные» ускорения [1], которые в проекциях на оси базовой СК имеют вид:

$$\begin{aligned} a_{X_g}^{\kappa} &= \frac{V_N V_H}{R_{\phi} + H} + \frac{V_E^2}{R_{\lambda} + H} \operatorname{tg} \varphi + 2V_E \Omega \sin \varphi; \\ a_{Y_g}^{\kappa} &= -\frac{V_N^2}{R_{\phi} + H} - \frac{V_E^2}{R_{\lambda} + H} - 2\Omega V_E \cos \varphi + g_{Y_g}; \\ a_{Z_g}^{\kappa} &= 2\Omega V_H \cos \varphi + \frac{V_E V_H}{R_{\lambda} + H} - \frac{V_E V_N}{R_{\lambda} + H} \operatorname{tg} \varphi + 2\Omega V_N \sin \varphi, \end{aligned}$$

где V_N , V_E , V_H - проекции относительной линейной скорости МЛА в направлении на Север, Восток и вертикаль места, а проекция ускорения свободного падения на вертикальную ось базовой СК g_{Y_g} определяется по

формуле (3) после вычисления вспомогательной величины R_2^2 по выражению (1) с заменой начальной высоты $H(0)$ на рассчитанную системой для текущего момента времени.

После вычисления «вредных» ускорений рассчитываются линейные ускорения и скорости движения центра масс МЛА в направлении на Север, Восток и вертикаль (в предположении, что старт производится с неподвижного основания):

$$\begin{aligned} \dot{V}_N &= a_{X_g} - a_{X_g}^{\kappa}; \quad \dot{V}_H = a_{Y_g} - a_{Y_g}^{\kappa}; \quad \dot{V}_E = a_{Z_g} - a_{Z_g}^{\kappa}; \\ V_N &= \int_0^t (\dot{V}_N) dt; \quad V_H = \int_0^t (\dot{V}_H) dt; \quad V_E = \int_0^t (\dot{V}_E) dt. \end{aligned}$$

Так как требуется вычислять линейные координаты МЛА в стартовой СК, то необходимо пересчитать скорости в эту СК:

$$V_{Nnc} = V_N \cos(\Psi(0)) - V_E \sin(\Psi(0)); \quad V_{Enc} = V_E \cos(\Psi(0)) + V_N \sin(\Psi(0)).$$

По которым, затем, вычисляются сами координаты:

$$D = \int_0^t (V_{Nnc}) dt; \quad H = \int_0^t (V_H) dt; \quad E = \int_0^t (V_{Enc}) dt.$$

Опыт показывает, что при частоте получения сигналов от ДУС и АКС сотни Гц, интегрирование приведенных выше выражений возможно численным методом трапеций.

Широта и долгота МЛА вычисляются путем интегрирования выражений для соответствующих скоростей [1]:

$$\dot{\phi} = \frac{V_N}{R_{\phi} + H}, \quad \dot{\lambda} = \frac{V_E}{(R_{\lambda} + H) \cdot \cos \varphi}.$$

Очевидно, что погрешности в определении угловых координат в первую очередь зависят от точности используемых ДУС, чем точнее ДУС,

тем меньше погрешности. Однако применение точных ДУС на борту МЛА не всегда оправдано экономически, и не всегда возможно из-за ограничений на массу и габариты БИНС. Поэтому актуальной является задача поиска методов, позволяющих уменьшить погрешности в определении угловой ориентации системы, построенной на грубых, малогабаритных ДУС малой стоимости.

Применение на борту МЛА, двигающегося по баллистической траектории, известных методов, использующих принцип построения аналитической вертикали места при совместной обработке сигналов ДУС и АКС, например [18], неэффективно. Это обусловлено тем, что проекции вектора кажущегося ускорения центра масс МЛА практически отсутствуют [10]. Т.е. показания АКС, установленных на МЛА, двигающегося по баллистической траектории близки к нулю. В таких условиях для коррекции сигнала об угле крена предлагается метод, поясняющийся рис. 8.

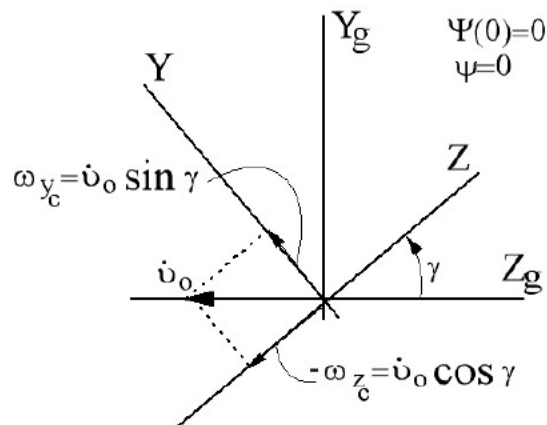


Рис. 8. К пояснению метода оценки угла крена МЛА, двигающегося по баллистической траектории

Поясним суть предлагаемого метода. При полете по баллистической траектории можно принять $\psi \approx 0$ и $\dot{\psi} \approx 0$. Тогда проекции абсолютной угловой скорости на оси связанной СК имеют вид:

$$\omega_x = \dot{\gamma}, \quad \omega_y = \dot{v} \sin \gamma, \quad \omega_z = \dot{v} \cos \gamma,$$

где ω_x , ω_y , ω_z - проекции абсолютной угловой скорости МЛА на оси связанной СК, указанным проекциям соответствуют показания ДУС $\omega_{x_c}, \omega_{y_c}, \omega_{z_c}$.

Очевидно, что $\sqrt{\omega_{y_c}^2 + \omega_{z_c}^2} = \dot{v}_o$, где $\dot{v}_o \approx \dot{v}$ - оценка угловой скорости тангажа, полученная на основе сигналов ДУС.

Оценку угла крена можно получить по выражению:

$$\gamma_o = \arcsin\left(\frac{\omega_{y_c}}{\dot{\gamma}_o}\right) = \arcsin\left(\frac{\omega_{y_c}}{\sqrt{\omega_{y_c}^2 + \omega_{z_c}^2}}\right).$$

В результате, можно получить информацию об угле крена без использования операции численного интегрирования угловых скоростей, а также без использования сигналов АКС.

Таким образом, имеется сигнал об угле γ , полученный при решении задачи ориентации и сигнал оценки этого угла γ_o . Спектр погрешности первого – низкочастотный, второго – высокочастотный. Разница в спектрах обусловлена тем, что γ получается путем численного интегрирования сигналов об угловой скорости, а γ_o – алгебраических операций сложения, возведения в квадрат и извлечения корня квадратного из тех же сигналов. Для совместной обработки сигналов применим известный метод комплексирования сигналов измерителей имеющих различный спектр погрешностей [7]. Применительно к решаемой задаче схема метода комплексирования показана на рис. 9. В результате из обоих сигналов «вырезаем» полезную составляющую.

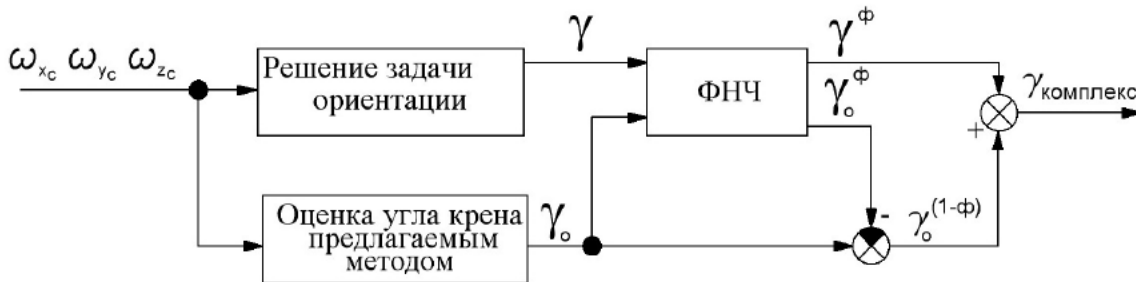


Рис. 9. Схема комплексирования сигналов об угле крена и его оценки:
ФНЧ – **фильтр низкой частоты с передаточной функцией $W(p)$, γ^ϕ ,
 γ_o^ϕ – **результат фильтрации соответствующих сигналов,**
 $\gamma_o^{(1-\phi)}$ – **результат фильтрации сигнала γ_o фильтром с передаточной**
функцией $(1 - W(p))$, $\gamma_{\text{комплекс}}$ – результирующий сигнал об угле крена**

Далее задача коррекции сигнала об угле крена сводится к выбору параметров фильтра, обеспечивающих с одной стороны эффективное подавление погрешностей, а с другой – малое время переходного процесса. Математическое моделирование для условий эксплуатации характерных для бортовой аппаратуры МЛА, показало, что при применении в качестве ФНЧ цифрового фильтра Баттерворда 4-го порядка с бесконечной импульсной характеристикой можно обеспечить погрешность в определении угла крена менее 2° .

Заключение.

Приведенная в статье математическая модель позволяет решить следующие задачи: начальная выставки БИНС, определение угловой ориентации МЛА, определение его координат в стартовой СК. Помимо этого в модели учтены разработанные методы уменьшения различных погрешностей ДУС и АКС, а также метод повышения точности вычисления угла крена. Адекватность предлагаемой математической модели подтверждена моделированием на ПЭВМ и экспериментальным путем.

Модель обеспечивает требуемую точность с минимально требуемой вычислительной сложностью и может быть рекомендована для БИНС, эксплуатируемых на борту управляемого МЛА с малым временем полета, движущихся в начальный период по баллистической траектории, построенной на базе ДУС класса точности $100^0_{\text{ч}}$ и АКС класса точности 10^{-3} м/с^2 .

Список литературы

1. Анучин О.Н., Емельянец Г.И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов /Под общей ред. члена-корреспондента РАН В.Г. Пешехонова. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 1999. 356с.
2. Богданов М.Б. Вычисление ускорения силы тяжести в бесплатформенной навигационной системе летательного аппарата // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 6. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Ч.1. С. 204-213.
3. Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В., Сухинин Б.В., Гаськова Н.Д. Способ уменьшения погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Известия Российской Академии ракетных и артиллерийских наук. Вып. 2 (60). Москва – Санкт-Петербург: Российская Академия ракетных и артиллерийских наук, 2009. С. 31 – 34.
4. Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В., Смирнов В.А. Анализ совместного влияния условий эксплуатации и погрешностей измерительных каналов на точность бесплатформенной системы ориентации // Гироскопия и навигация. №3 (62). Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2008. С. 53 – 59.
5. Богданов М.Б., Савельев В.В. Метод определения мультипликативных погрешностей измерительных каналов бесплатформенной инерциальной навигационной системы, содержащих датчики угловой скорости // Известия тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 11. Ч. 2. Тула: ТулГУ, 2012. С. 130-137.
6. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем. М.: Наука, 1992. 280 с.
7. Браславский Д.А., Петров В.В. Точность измерительных уст-

ройств. М.: Машиностроение, 1976. 312 с.

8. Глобальная навигационная спутниковая система. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1 и L2 (редакция 5.1). М: Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения. 2008. 74 с.

9. ГОСТ Р 51794-2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразования координат определяемых точек. М.: Стандартинформ, 2009. 19 с.

10. Емельянцева Г.И., Блажнов Б.А., Коротков А.Н., Несенюк Л.П., Степанов А.П. Об особенностях построения интегрированной инерциально-спутниковой системы для объектов,двигающихся в начальный период по баллистической траектории // Гироскопия и навигация. 2009. №1. С. 9-21.

11. Захарин М.И., Захарин Ф.М. Кинематика инерциальных систем навигации. М.: Машиностроение, 1968. 236 с.

12. Мезенцев, А.П. Среднеточная ИНС «АИСТ-320» с кориолисовым вибрационным гироскопом «АИСТ-100». Идеология и результаты разработки, производства и испытаний / А.П. Мезенцев [и др.] // Гироскопия и навигация. 2007. №3 (58). С. 3-19.

13. Панов А.П. Математические основы теории инерциальной ориентации. – Киев: Наукова думка, 1995. 280 с.

14. Пат. 2140088 РФ, МКИ 6 G 01 P9/02. Трехкомпонентный измеритель угловой скорости / В.В. Савельев, А.Е. Яковлев, М.Б. Богданов / Оpubл. 20.10.99. Бюл. №29. Приоритет 04.12.98.

15. Пат. 2337316 РФ, МПК G 01 C 21/16. Бесплатформенная инерциальная система / Богданов М.Б., Савельев В.В., Сухинин Б.В., Прохорцов А.В. / Оpubл. 27.10.2008, Бюл. №30. Приоритет 11.12.2006.

16. Пат. 2282199 РФ, МПК G 01 P 9/02. Бесплатформенная система ориентации / Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В., Аверчева А.Ю. / Оpubл. 20.08.2006. Бюл. №23. Приоритет 28.03.2005.

17. Пат. 2456546 РФ, МПК G 01 C 21/00. Бесплатформенная система ориентации / Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В., Юдакова Н.Д. / Оpubл. 12.07.2012. Бюл. №20. Приоритет 16.12.2010.

18. Пат. 2244262 РФ, МПК G 01 C 21/00. Система измерения угловых положений летательного аппарата / Петров В.М. [и др.] / Оpubл. 20.06.2004. Приоритет 27.12.2002.

19. Постановление Правительства РФ от 28.07.2000 №568 [Электронный ресурс] // Консультант плюс: [сайт]. URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=28045> (дата обращения: 04.07.2013). и распоряжением Правительства РФ от 20.06.2007 №797-р [Электронный ресурс] // Нью Сити: [сайт]. URL: <http://news-city.info/akty/legalsystem-17/tekst-wo-civil-rossiya.htm> (дата обращения: 04.07.2013).

20. Разоренов Г.Н., Бахрамов Э.А., Титов Ю.Ф. Системы управления летательными аппаратами (баллистическими ракетами и их головными частями). М.: Машиностроение, 2003. 583 с.

21. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Себрякова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 556 с.

22. Технические характеристики инерциального измерительного блока АИСТ-350Т [Электронный ресурс] // [сайт]. URL: <http://isense.ru/ru/index/> (дата обращения: 04.07.2013).

Савельев Валерий Викторович, д-р техн. наук, проф., Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Богданов Максим Борисович, канд. техн. наук, доц., Россия, Тула, Тульский государственный университет

**MATHEMATICAL MODEL CALCULATION OF COORDINATES
SMALL-SIZED GUIDED AIRCRAFT WITH A SMALL TIME FLIGHT
MOVE IN THE INITIAL PERIOD A BALLISTIC TRAJECTORY**

V.V. Savelev, M.B. Bogdanov

The article presents the mathematical equations underlying algorithmic software strapdown inertial navigation system. The above system is used on board the aircraft managed small-sized, low-flying, moving initially on a ballistic trajectory.

Key words: strapdown inertial navigation system, a mathematical model, the parameters of orientation and navigation.

Savelev Valeriy Viktorovich, doctor of technical sciences, professor, Russia, Tula, Tula State University,

Bogdanov Maksim Borisovich, candidate of technical science, docent, Russia, Tula, Tula State University

АКСЕЛЕРОМЕТР КОМПЕНСАЦИОННОГО ТИПА

В.В. Кулешов

Рассматривается структурный метод расширения полосы пропускания акселерометра компенсационного типа, охваченного обратными связями разных знаков. Полученные зависимости могут быть использованы при разработке высокоточных систем стабилизации и навигации.

Ключевые слова: полоса пропускания, корректирующие звенья, топологический синтез, обратная связь, частота среза, астатизм.

Недостатком существующих акселерометров, с жесткой отрицательной обратной связью, является низкая точность измерения, так как выбор коэффициента усиления по разомкнутому контуру ограничен условием устойчивости системы и полосой пропускания [1]. Расширение полосы пропускания акселерометра компенсационного типа можно обеспечить путем введения в систему корректирующих звеньев, что в конечном итоге приводит к незначительному изменению полосы пропускания [2].

Целью данной работы является разработка структурного метода расширения полосы пропускания в акселерометрах компенсационного типа. Поставленная цель достигается путем реализации топологического синтеза в результате, которого устанавливаются число и место включения регуляторов, т.е. подмножество обратных связей. Наиболее естественными и в общем случае противоречивыми критериями выбора являются условия минимизации числа обратных связей, сложности структур их операторов, усиления контуров обратной связи. Топологический синтез предполагает, что на каждой итерации акселерометр охватывается одной обратной связью. При этом, выбирается место включения обратной связи до конкретизации структуры ее операторов и значений параметров. Максимальное число обратных связей, которые можно реализовать в акселерометре компенсационного типа определяется по формуле $N = 2^{k_1 \cdot k_2} - 1$ (где k_1, k_2 число входов и выходов в системе) и для большинства мехатронных систем компенсационного равно трём [2].

Проведем анализ акселерометра компенсационного типа, охваченного тремя обратными связями. Структурная схема акселерометра, охваченного обратными связями, изображена на рис.1., в которой использованы следующие обозначения: K_d, K_{yc} - коэффициенты передачи датчика угла и усилителя; T, ξ - постоянная времени и коэффициент демпфирования, K_{oc}, K_{oc1}, K_{oc3} - коэффициенты передачи цепи местными отрицательной, положительной обратными связями и отрицательной интегрирующей

обратной связью; K – коэффициент передачи интегратора; T_1 – постоянная времени сглаживающего фильтра, включенного в местную отрицательную обратную связь для обеспечения устойчивости и компенсации действия положительной обратной связи.

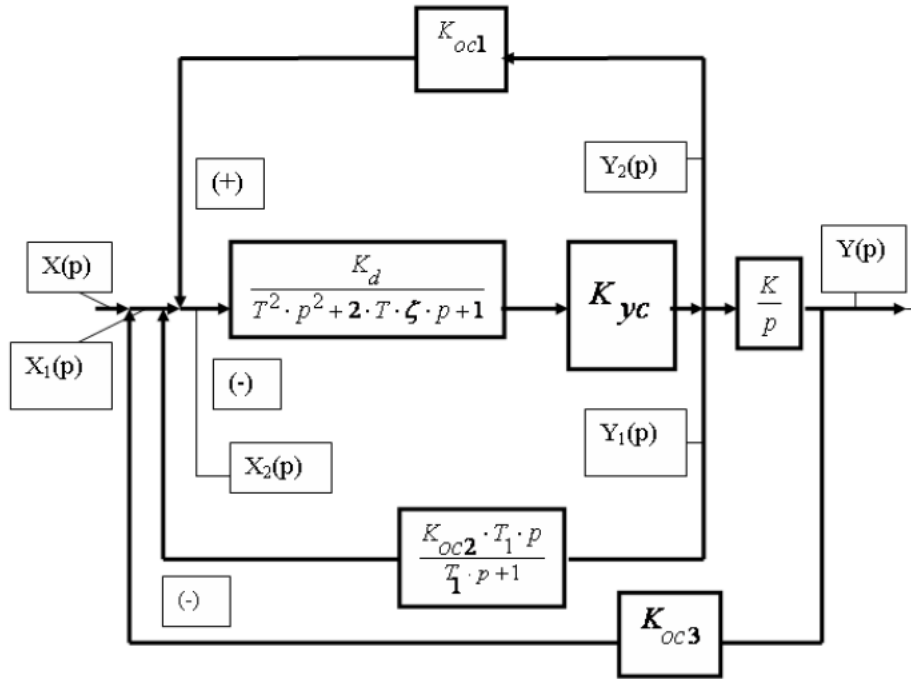


Рис. 1. Структурная схема акселерометра компенсационного типа

Оценим динамику акселерометра компенсационного типа с помощью передаточных функций. Передаточная функция акселерометра, по контуру местной положительной обратной связи, что $K_d \cdot K_{oc1} \cdot K_{yc} = 1$, запишется при условии что $K_d \cdot K_{oc1} \cdot K_{yc} = 1$ в виде:

$$\frac{Y_2(p)}{X_2(p)} = \frac{K_0}{p(T_0 \cdot p + 1)},$$

где $K_0 = K_d \cdot K_{yc} / 2 \cdot \xi \cdot T$; $T_0 = T / 2 \cdot \xi$.

Передаточная функция акселерометра по контуру местной отрицательной обратной связи запишется как:

$$\frac{Y_1(p)}{X_1(p)} = \frac{K_{01}(T_1 \cdot p + 1)}{p(T^2 \cdot p + 2 \cdot \xi_0 \cdot T_{01} \cdot p + 1)};$$

где $K_{01} = K_0 / (1 + K_0 \cdot K_{oc1} \cdot T_{11})$; $T_{01} = \sqrt{\frac{T_0 \cdot T_1}{1 + K_0 \cdot K_{oc1} T_1}}$;
 $2 \cdot \xi_0 \cdot T_{01} = (T_0 + T_1) / (1 + K_0 \cdot K_{oc1} \cdot T_1)$.

Введем обозначения, $T_1 = m \cdot T_{01}$, где m – параметр, обеспечивающий устойчивость акселерометра по фазе при значениях ($6 > m > 1$).

В этом случае, параметры акселерометра компенсационного типа, при охвате системы местными обратными связями разных знаков, будут определяться как: $T_{01} = T_0 \cdot m \cdot 2 \cdot \xi_0 / (1 + m)$, $2 \cdot \xi_0 = \frac{(1 + m)}{\sqrt{m \cdot (1 + K_0 \cdot K_{oc1} \cdot T_{01})}}$.

Величина относительного коэффициента демпфирования ξ_0 может быть обеспечена заданным значением параметров $(1 + K_0 \cdot K_{oc1} \cdot m \cdot T_{01})$. Введем параметр $m_1 = T_1 / T_{01} = (1 + m) / 2 \cdot \xi_0$. В этом случае частота среза акселерометра компенсационного типа, по контуру отрицательной интегрирующей обратной связи, определится в виде:

$$\omega_{cp} \leq \frac{\xi \cdot (1 + m)}{m \cdot \xi_0 \cdot T} \sqrt{\frac{2 \cdot \xi_0^2 \cdot m_1 - m_1 - \xi_0 \cdot m_1^2 - \xi_0 \pm \sqrt{(2 \cdot \xi_0^2 \cdot m_1 - m_1 - \dots - \xi_0 \cdot m_1^2 - \xi_0^2)^2 + (m_1 - 2 \cdot \xi_0)(m \cdot m_1)}}{m_1 \cdot m}} \dots$$

Устойчивость в акселерометре компенсационного типа обеспечивается за счет параметра m_1 , который должен удовлетворять условию, $6 < m_1 < 1$, а увеличение частоты среза ω_{cp} достигается за счет выбора параметра m , который может быть $m \ll 1$.

Реализуемый коэффициент усиления по разомкнутому контуру определяется как:

$$K_{oc3} \cdot K \cdot K_0 \leq \frac{\omega_{cp} \sqrt{(1 - T_0^2 \cdot \omega_{cp}^2)^2 + 4 \cdot \xi_0^2 \cdot T_0^2 \cdot \omega_{cp}^2}}{\sqrt{m_1 \cdot T_0^2 \cdot \omega_{cp}^2 + 1}}.$$

При наличии в акселерометре местных обратных связей разных знаков и отрицательной интегрирующей обратной связи частота среза и коэффициент усиления по разомкнутому контуру при параметрах: $T = 0.2c$, $\xi = 2$, $m = 4$, $\xi_0 = 0.5$ тогда $T_0 = 0.04c$, $m_1 = 5$, будут равны: $\omega_{cp} = 9.25c^{-1}$, и $K_{oc3} \cdot K \cdot K_0 = 37.94c^{-2}$.

В акселерометре компенсационного типа с жесткой отрицательной обратной связью с параметрами $T = 0.2c$, $\xi = 0.72$ значения частоты среза и коэффициентов передачи по разомкнутому контуру соответственно равны: $\omega_{cp} \leq 7.52c^{-1}$; $K \leq 30c^{-2}$. При значениях $m = 0.1$ и $\xi = 0.125$, параметры акселерометра с местными обратными связями разных знаков и с интегрирующей отрицательной обратной связью будут соответственно рав-

ны: $T_0 = 0.01\text{с}$, $\omega_{cp} \leq 473,68\text{с}^{-1}$ и $K_{ocz} \cdot K \cdot K_0 = 62615\text{с}^{-2}$.

Из полученных значений следует, что по сравнению с акселерометром с жесткой отрицательной обратной связью частота среза в акселерометре с местными обратными связями и охватывающей отрицательной интегрирующей обратной связью увеличилась в 62,99 раза и во столько же раз возросла полоса пропускания, и коэффициент усиления по разомкнутому контуру увеличился в 2087,19 раза, что позволяет обеспечить устойчивость системы при значительном коэффициенте усиления по разомкнутому контуру.

Предложенный структурный метод построения акселерометров с местной положительной обратной связью, с местной отрицательной обратной связью, с фильтром верхних частот и отрицательной интегрирующей обратной связью приводит к положительному эффекту.

Таким образом, введение в систему местных обратных связей разных знаков и охватывающей все устройство отрицательной интегрирующей обратной связи увеличивает точность и расширяет полосу пропускания.

Реализация в системе местных обратных связей разных знаков обеспечивает устойчивость и расширение полосы пропускания, а охватывающая отрицательная интегрирующая обратная связь повышает точность за счет астатизма первого порядка.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем компенсационного типа применяемых в системах стабилизации и навигации.

Список литературы

1. Коновалов С.В., Никитин Е.А., Селиванова Л.М. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем. Ч. III. Акселерометры, датчики угловой скорости, интегрирующие гироскопы и гиросинтезаторы. / под ред. Д.С. Пельпора. М.: Высш. шк. 1980.

2. Структурный метод повышения точности маятникового компенсационного акселерометра / А.Г. Бурик // Изв. Вузов Приборостроение. 1981. №3. С. 61-64.

Кулешов Владимир Вениаминович, канд. техн. наук, доц.,
v47kuleshov@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет.

ACCELEROMETR COMPENCATION TYPE.

VV Kuleshov

We consider the structural method bandwidth extension accelerometer compensation type covered feedbacks of different signs. These relationships can be used to develop and stabilize the precision navigation systems.

Key words: bandwidth, corrective links, topological synthesis, feedback, cutoff frequency, astatizm.

Vladimir Kuleshov Veniaminovich, candidate of technical sciences, docent, v47kuleshov@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

УДК 378:371.3

ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ИНТЕРНЕТ-ТЕСТИРОВАНИЕ ПЕРВОКУРСНИКОВ – ЭФФЕКТИВНАЯ ФОРМА КОНТРОЛЯ И ОБУЧЕНИЯ

Е.С. Бемянская, С.К. Тусюк

Рассмотрена методика проведения диагностического Интернет-тестирования первокурсников Тульского государственного университета по предметам школьного курса, проводится анализ результатов студентов кафедры «Приборы и биотехнические системы».

Ключевые слова: диагностическое Интернет-тестирование, тестирование первокурсников.

С 2011 года Тульский государственный университет (ТулГУ) принимает участие в диагностическом Интернет-тестировании студентов первого курса, которое проводится научно-исследовательским институтом мониторинга качества образования (г. Йошкар-Ола). Перечень контролируемых дисциплин увеличивается с каждым годом. Так, в 2011 году тестирование проводилось по предметам «Математика», «Физика», «Русский язык», а в 2013 году этот список пополнился такими дисциплинами, как «Информатика», «Английский язык», «Биология», «История», «Обществознание», «Химия». Целью процедуры тестирования является оценка уровня фундаментальной подготовки по перечисленным выше предметам школьного курса, а также диагностика психологической готовности к обучению в вузе. Диагностика готовности первокурсников к продолжению обучения в вузе выявляет особенности мотивации к учению и интеллектуальные способности, как факторы дальнейшего успешного обучения студентов. Кроме этого, диагностическое тестирование является эффективной проверкой знаний в условиях массового контроля, а автоматическая проверка результатов тестирования позволяет в тот же день получить информационно-аналитические материалы по каждому студенту (табл. 1).

Процедура тестирования первокурсников в ТулГУ проводится в два этапа. В сентябре-октябре проходит начальный контроль уровня знаний студентов. Цель данного этапа - выявление имеющихся пробелов знаний по дисциплине на начальной стадии обучения в вузе. С целью сохранения сетки расписания учебного процесса диагностическое тестирование по каждому предмету рассчитано на 80 минут и проводится в свободное от занятий время. Полученные результаты доводятся до ведущих преподавателей и служат основой для целенаправленной работы по повышению качества образовательного процесса в университете. Следует отметить, что при разработке учебных планов ФГОС в ТулГУ для улучшения качества подготовки студентов дополнительно введены адаптивные дисциплины: «Математическая составляющая естественнонаучных дисциплин» и «Введение в физику», на которых устраняются выявленные пробелы в знаниях отдельных разделов. После проведения коррекционных занятий, в середине декабря проходит второй этап диагностического тестирования, на котором проверяются группы студентов, показавшие самые слабые результаты во время первого этапа. Как показал анализ результатов тестирования в 2011 году, по всем проверяемым группам наблюдается положительная динамика - средний процент правильно выполненных заданий в этих группах возрастает на 15-20%.

Таблица 1

Информационно-аналитическая карта группы

ФИО студента	Логин	Время начала и окончания тестирования	Кол-во заданий, даны ответы	Кол-во правильно выполненных заданий	Процент правильно выполненных заданий	Протокол ответа студента
Иванов Алексей Андреевич	11ds116064	09:38 - 10:33	26 из 26	15	57%	
Петров Илья Сергеевич	11ds116070	09:37 - 10:45	26 из 26	14	53%	
Сидоров Иван Вячеславович	11ds116065	09:33 - 10:42	26 из 26	13	50%	

Следует отметить возможность прохождения студентами самостоятельного обучения и самоконтроля знаний по тестируемым дисциплинам с использованием сайта www.i-exam.ru в рубрике «Студентам вузов» на странице «Для первокурсников», «Подготовка к диагностическому тестированию».

В табл. 2 приведены результаты диагностического тестирования студентов кафедры «Приборы и биотехнические системы», обучающихся по направлениям 200100 «Приборостроение», 201000 «Биотехнические

системы и технологии» (в таблице обозначено ДТ1 - диагностическое тестирование в октябре 2011 г., ДТ2 - диагностическое тестирование в декабре 2011 г.).

Таблица 2

**Результаты диагностического тестирования студентов кафедры
«Приборы и биотехнические системы»**

Дисциплина	Код направления	Результат ЕГЭ (средний балл в группе)	Результат ДТ1 (средний балл в группе)	Результат ДТ2 (средний балл в группе)
Физика	200100	46	35	48
Физика	201000	48	38	50

Таким образом, результаты диагностического тестирования первокурсников позволяют перевести учебный процесс на более высокий уровень, спрогнозировать успешность учебной деятельности студентов, выявить пробелы в знаниях уже на начальном этапе обучения, а также принять обоснованные управленческие решения по развитию и саморазвитию для эффективного обучения в ТулГУ.

Белянская Елена Сергеевна, канд. техн. наук, доц., nes2451@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Тусюк Сергей Константинович, канд. техн. наук, проф., tsk46@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

**DIAGNOSTIC INTERNET TESTING FIRST-YEAR STUDENTS -
EFFECTIVE FORM CONTROL AND TRAINING**

E.S. Belyanskaya, S.K. Tusyuk

The technique of diagnostic testing Internet Tula State University students in the subjects of school course, an analysis of the results students of "Devices and Biotechnical Systems" chair.

Key words: Internet diagnostic testing, testing first-year students.

Belyanskaya Elena Sergeevna, candidate of technical science, docent, nes2451@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Tusyuk Sergey Konstantinovich, candidate of technical science, professor, tsk46@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 316 (075.8)

СОЦИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТУДЕНТОВ-ПЕРВОКУРСНИКОВ – СОСТАВНАЯ ЧАСТЬ ВНЕУЧЕБНОЙ РАБОТЫ В ВУЗЕ

Н.С. Тархов

Рассмотрены результаты социологических исследований студентов первого курса факультета систем автоматического управления ТулГУ.

Ключевые слова: социологический опрос, анкетирование, внеучебная воспитательная работа.

Социологические опросы находят в настоящее время широкое применение. В социологии при сборе первичных данных используют четыре основных метода, каждый из которых имеет по две основных разновидности: опрос (анкетирование и интервьюирование), анализ документов (качественный и количественный), наблюдение (невключенное и включенное), эксперимент (контролируемый и неконтролируемый). Анкетный опрос – самый массовый и продуктивный вид деятельности в социологии. С его помощью собирается до 80% социологической информации [1].

Согласно Концепции воспитательной работы в Тульском государственном университете (Новая редакция), принятой на заседании Совета университета по ВВР и утвержденной Ученым советом 24.06.2010г., «внеучебная деятельность в университете предполагает создание объективных условий для творческого становления молодого специалиста, формирование благоприятной атмосферы для самостоятельной инновационной деятельности самих студентов в свободное от учебы время, развитие установки на престижность участия студента во внеучебной жизни вуза». Поэтому работа по содействию раскрытия научного и творческого потенциала студентов начинается с первого курса и предполагает содействие студентам в усвоении норм и требований вузовской жизни, адаптации к новым условиям; формирование активной академической и общественной позиции, показ возможностей для удовлетворения разных интересов и самореализации [2].

В соответствии с этим для оказания помощи кураторам учебных групп в университете ежегодно в сентябре проводится анкетирование первокурсников по анкетам, разработанным студенческим клубом. На факультете систем автоматического управления в рамках работы со студентами-первокурсниками систематически проводятся социологические исследования, которые можно отнести к повторным по «совокупности нескольких исследований, проведенных по единой программе и инструментарию последовательно через определенные промежутки времени, призванные по-

лучить результаты, характеризующие динамику измерения объекта и представляют собой средство сравнительного анализа». Предлагаемые вопросы и варианты ответов для первокурсников представлены в табл. 1.

Таблица 1

Вопросы и варианты ответов анкеты для первокурсников

Вопрос	Варианты ответов
1.Как Вы обычно проводите свое свободное время? (не более 3 вариантов)	1.1. гуляю, встречаюсь с друзьями 1.2. хожу в гости 1.3. сижу в Интернете 1.4. смотрю телевизор 1.5. читаю книги, журналы, газеты 1.6. посещаю спортивные секции, творческие кружки и т.д. 1.7. занимаюсь спортом 1.8. подрабатываю
2.Каковы Ваши основные интересы, увлечения? (не более 3 вариантов)	2.1. музыка 2.2. танцы 2.3. спорт 2.4. фотография 2.5. театральное искусство 2.6. пение 2.7. наука 2.8. историческая реконструкция
3.Состоите ли Вы в каких-либо секциях, кружках, творческих коллективах?	
4.В каких секциях, кружках состоите?	4.1. музыкальных 4.2. танцевальных 4.3. спортивных 4.4. театральных 4.5. научных 4.6. интеллектуальных 4.7. творческих 4.8 играю (играл) в КВН
5.Есть ли у Вас музыкальное образование?	
6.Имеется ли у Вас опыт публичного выступления на сцене?	
7.Каков Ваш опыт публичных выступлений?	7.1. вокальные выступления (соло) 7.2. вокальные выступления (группа) 7.3. выступление с хором 7.4. выступление с музыкальной группой 7.5. танцевальные выступления (соло) 7.6. выступление с танцевальным коллективом 7.7.театральные постановки 7.8.КВН 7.9. художественное чтение

Окончание табл. 1

Вопрос	Варианты ответов
8. Как Вы планируете использовать свое свободное время в процессе обучения в ТулГУ?	8.1. только учиться 8.2. учиться и работать 8.3. получать вторую профессию 8.4. общаться с друзьями 8.5. заниматься научной работой 8.6. заниматься спортом 8.7. участвовать в общественной жизни 8.8. заниматься в творческих коллективах, клубах по интересам
9. Есть ли у Вас желание заниматься в творческих коллективах, секциях?	
10. Какие направления деятельности студ. клуба Вас интересуют?	10.1. клуб «Что? Где? Когда?» 10.2. КВН 10.3. вокальные коллективы 10.4. танцевальные коллективы 10.5. музыкальные коллективы 10.6. театральные студии 10.7. клубы военно-исторической реконструкции 10.8. клубы культуры и искусства 10.9. рукопашный бой

Результаты обработки 535 анкет студентов-первокурсников 2004, 2011, 2012 и 2013 годов поступления представлены в табл. 2. В 2004 году анкета отличалась от современного варианта, поэтому в таблице содержится только часть ответов, однако они дополняют общие сведения об интересах, увлечениях бывших абитуриентов и планируемые направления их деятельности в рамках внеучебной работы университета.

Таблица 2

Статистические данные по результатам обработки анкет студентов факультета САУ

Вопрос	Варианты ответов	Кол-во ответов				% от кол-ва анкетированных в			
		Год				Год			
		2013	2012	2011	2004*	2013	2012	2011	2004
1	1.1	176	62	172		85,02	81,58	86,43	
	1.2	4	2	10		1,93	2,63	5,03	
	1.3	124	44	118		59,90	57,89	59,30	
	1.4	10	5	21		4,83	6,58	10,55	
	1.5	58	20	43		28,02	26,32	21,61	

Продолжение табл. 2

Вопрос	Варианты ответов	Кол-во ответов				% от кол-ва анкетированных в			
		Год				Год			
		2013	2012	2011	2004*	2013	2012	2011	2004
1	1.6	37	23	46		17,87	30,26	23,12	
	1.7	84	39	107		40,58	51,32	53,77	
	1.8	25	6	19		12,08	7,89	9,55	
2	2.1	121	37	126		58,45	48,68	63,32	
	2.2	23	5	24		11,11	6,58	12,06	
	2.3	99	47	123		47,83	61,84	61,81	
	2.4	24	5	31		11,59	6,58	15,58	
	2.5	11	3	7		5,31	3,95	3,52	
	2.6	9	2	11		4,35	2,63	5,53	
	2.7	45	12	30		21,74	15,79	15,08	
	2.8	5	2	5		2,42	2,63	2,51	
3	3.1	39	17	50		18,84	22,37	25,13	
4	4.1	9	2	13		4,35	2,63	6,53	
	4.2	2	0	7		0,97	0,00	3,52	
	4.3	31	14	34		14,98	18,42	17,09	
	4.4	1	0	2		0,48	0,00	1,01	
	4.5	1	1	1		0,48	1,32	0,50	
	4.6	1	2	0		0,48	2,63	0,00	
	4.7	3	0	1		1,45	0,00	0,50	
	4.8	4	1	8		1,93	1,32	4,02	
5	5.1	25	5	25	8	12,08	6,58	12,56	15,09
6	6.1	94	24	86	6	45,41	31,58	43,22	11,32
7	7.1	8	2	8		3,86	2,63	4,02	
	7.2	11	6	11		5,31	7,89	5,53	
	7.3	6	3	10		2,90	3,95	5,03	
	7.4	14	4	15		6,76	5,26	7,54	
	7.5	2	1	5		0,97	1,32	2,51	
	7.6	21	7	22		10,14	9,21	11,06	

Окончание табл. 2

Вопрос	Варианты ответов	Кол-во ответов				% от кол-ва анкетированных в			
		Год				Год			
		2013	2012	2011	2004*	2013	2012	2011	2004
7	7.7	28	10	30		13,53	13,16	15,08	
	7.8	21	8	23		10,14	10,53	11,56	
	7.9	20	6	13		9,66	7,89	6,53	
8	8.1	45	15	36	5	21,74	19,74	18,09	9,43
	8.2	58	16	55	12	28,02	21,05	27,64	22,64
	8.3	4	0	5		1,93	0,00	2,51	
	8.4	79	30	70	37	38,16	39,47	35,18	69,81
	8.5	10	8	14		4,83	10,53	7,04	
	8.6	61	29	73	24	29,47	38,16	36,68	45,28
	8.7	34	12	54	0	16,43	15,79	27,14	
	8.8	28	9	44		13,53	11,84	22,11	
9	9.1	109	52	140	20	52,66	68,42	70,35	37,74
10	10.1	19	11	15		9,18	14,47	7,54	
	10.2	62	14	59		29,95	18,42	29,65	
	10.3	1	1	12		0,48	1,32	6,03	
	10.4	15	9	19		7,25	11,84	9,55	
	10.5	56	10	47		27,05	13,16	23,62	
	10.6	11	0	11		5,31	0,00	5,53	
	10.7	33	8	18		15,94	10,53	9,05	
	10.8	9	0	4		4,35	0,00	2,01	
	10.9	1	0	72		0,48	0,00	36,18	
	10.10	0	0	9		0,00	0,00	4,52	
Итого		207	76	199	53				

*- анкета другого образца (на часть вопросов ответов нет).

На рис. 1-5 представлено графическое отображение некоторых ответов (в процентном отношении от количества анкетированных) в зависимости от года поступления. Подавляющее большинство поступивших на факультет гуляют и встречаются с друзьями, более половины – проводят сво-

бодное время в Интернете. Читающих книги и периодические издания порядка 20-30 процентов. Лидирующее положение среди увлечений и интересов принадлежит спорту, 50-60 процентов – состоят в спортивных секциях.

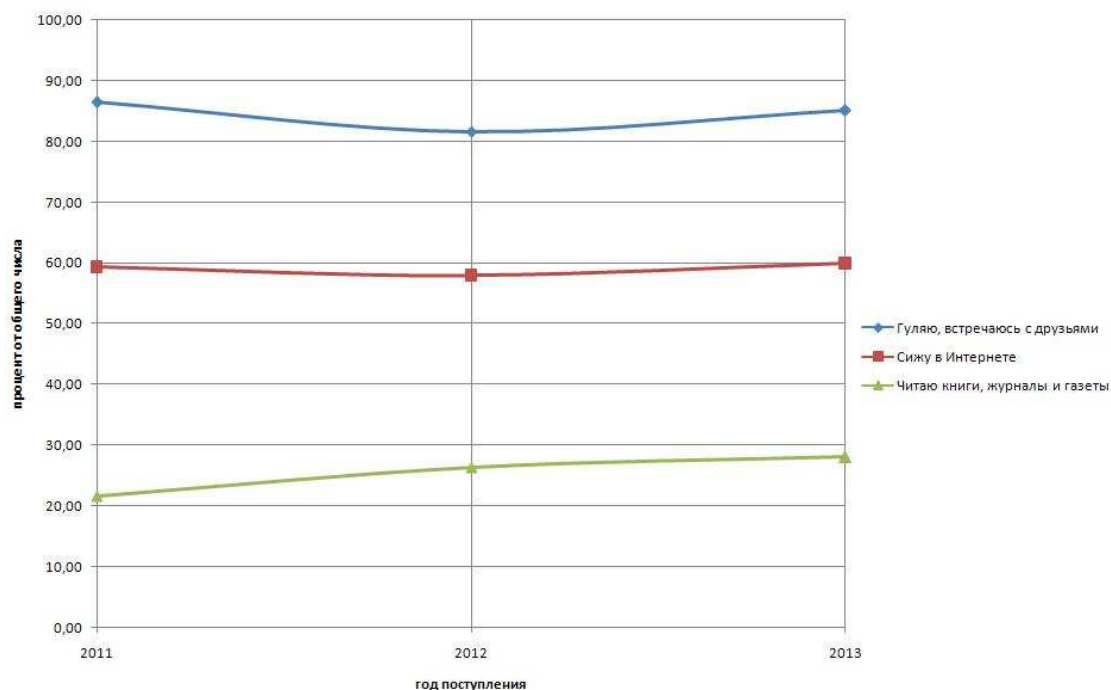


Рис. 1. Ответы на вопрос: «Как Вы обычно проводите свое свободное время?»

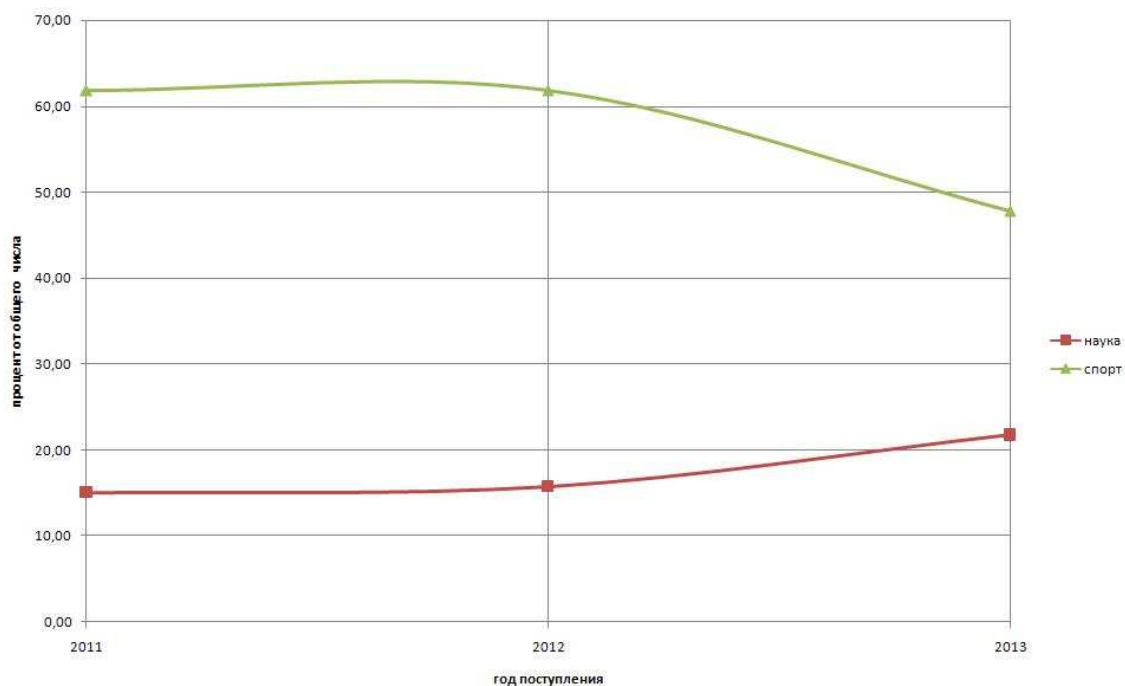


Рис.2. Ответы на вопрос: «Ваши основные интересы, увлечения?»

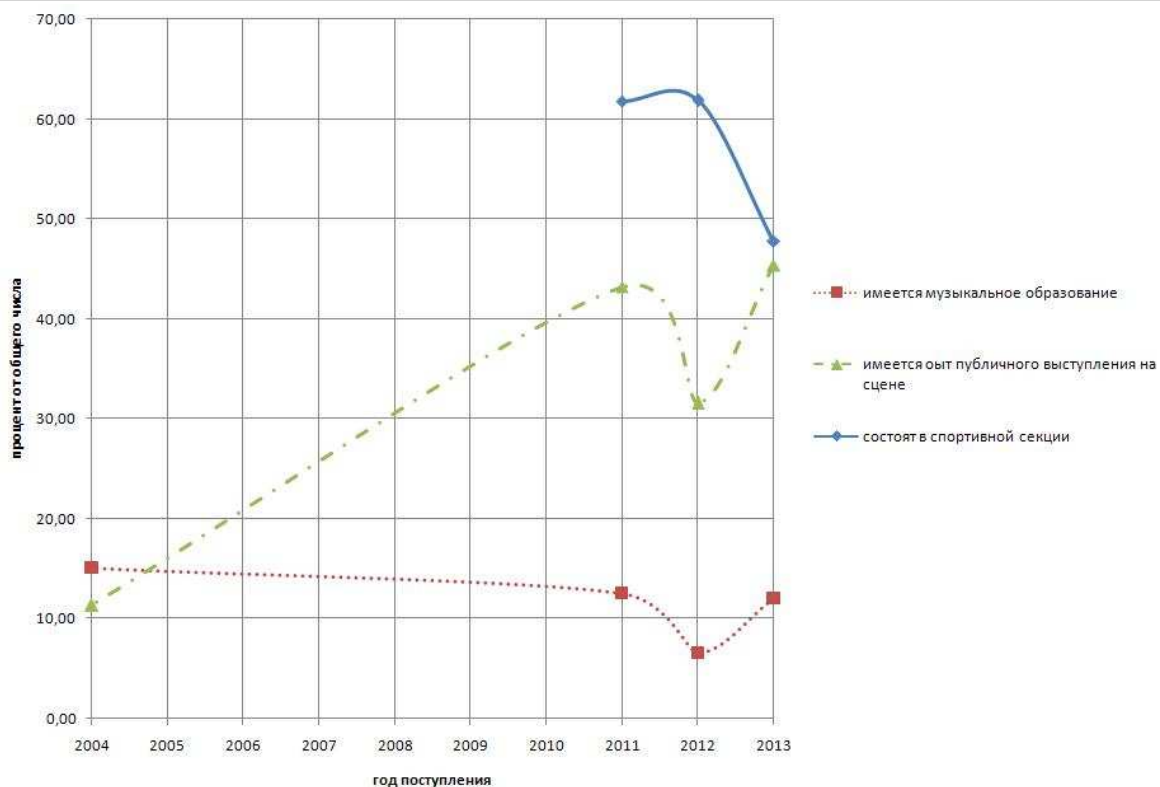


Рис.3. Ответы на вопрос: «Каков Ваш опыт публичных выступлений?»

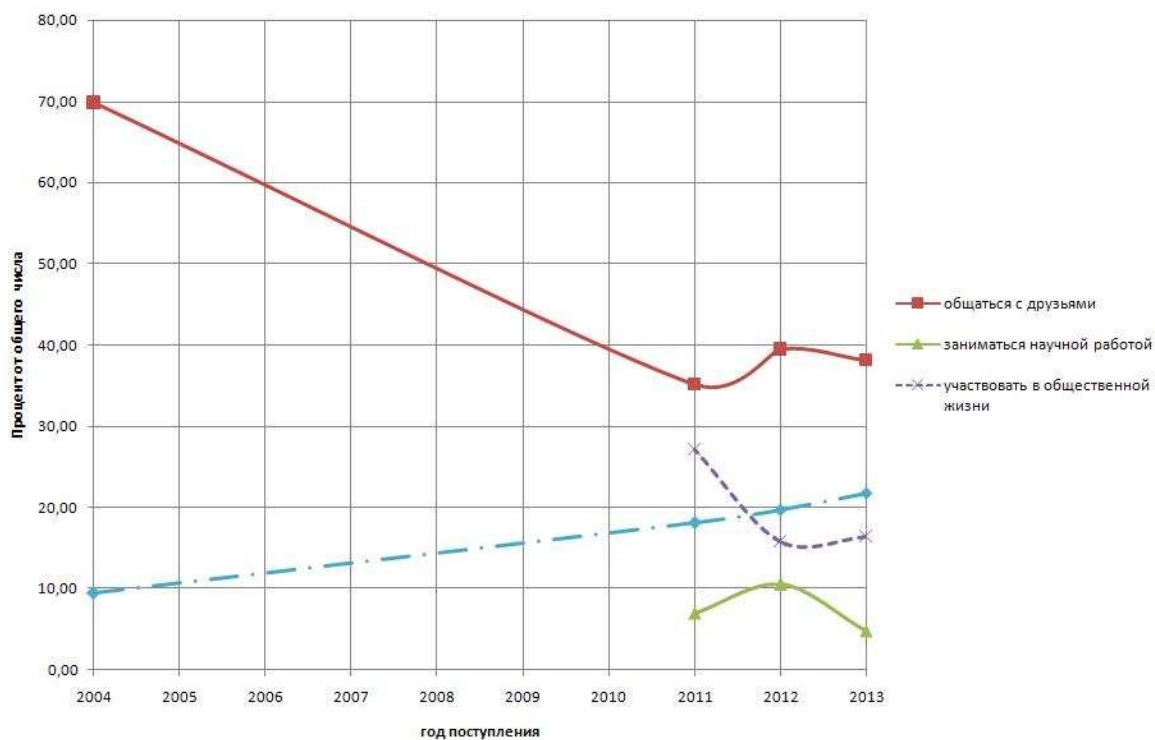


Рис.4. Ответы на вопрос: «Как Вы планируете использовать свое свободное время?»

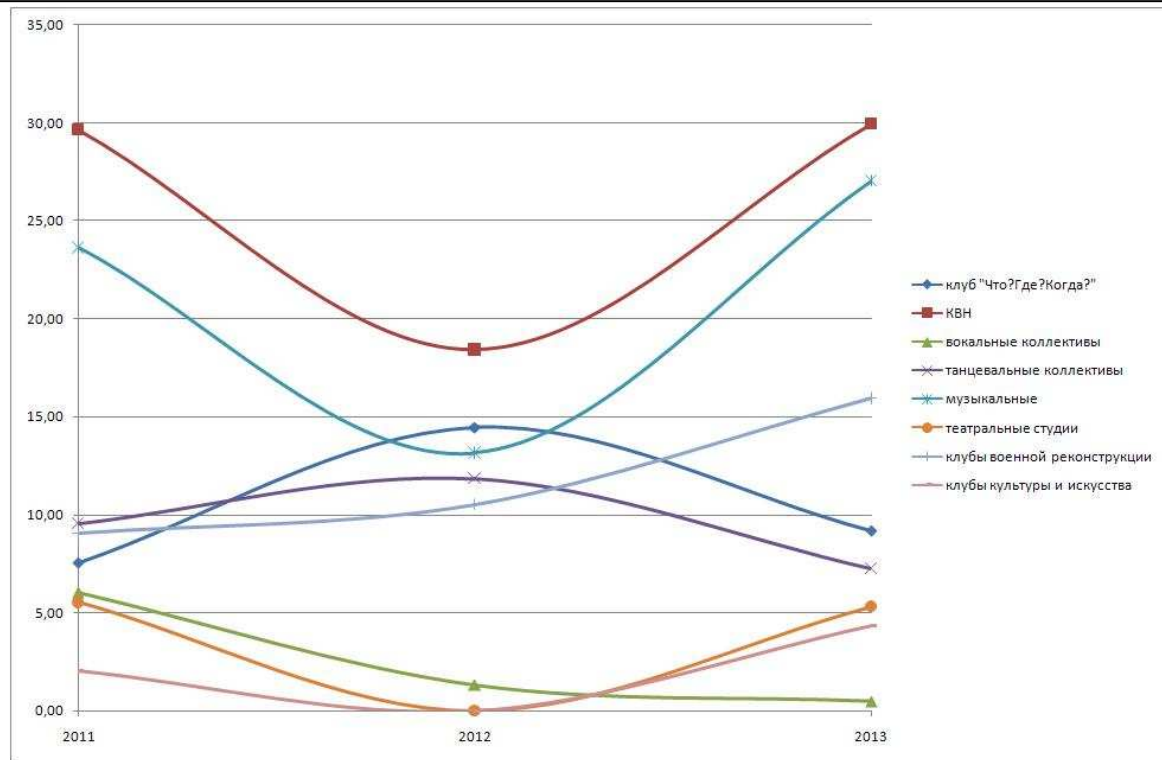


Рис.5. Ответы на вопрос: «Какие направления деятельности студенческого клуба Вас интересуют?»

Осенью текущего года сборная команда первокурсников ИВТС им. В.П. Грязева (состоит из студентов факультетов МС и САУ) заняла 2 место в университете среди команд студентов-первокурсников, в 2012 году – 1 место. Желающих заниматься наукой в начале обучения в высшей школе традиционно мало, однако в перспективе желающих общаться с друзьями по сравнению с 2004 годом сокращается вдвое, а желающих только учиться, хотя и медленно, но неуклонно растет. Это приводит на старших курсах к увеличению студентов, занимающихся научно-исследовательской работой. Вместе с тем, из года в год увеличивается количество абитуриентов, имеющих опыт публичных выступлений на сцене (порядка 10 процентов имеют музыкальное образование), что и показывает ежегодно проводимый в ноябре смотр творчества первокурсников.

Из всего многообразия направлений деятельности студенческого клуба университета лидирует желание студентов заниматься в КВН. Из 62 первокурсников, желающих участвовать в играх КВН, было отобрано порядка десяти человек, имеющих опыт выступлений в школах, которые сначала сформировали свою команду и выступили в играх студентов-первокурсников, а затем, в составе команды ИВТС им. В.П. Грязева «С точностью до наоборот», приняли участие в финале игр КВН политеховской лиги, и команда заняла 1 место. Далее следуют танцевальные и музыкальные коллективы, клубы «Что?Где?Когда?» и военной реконструкции.

В ноябре на XI Кубке ректора по интеллектуальным играм команда первокурсников одной из кафедр факультета заняла 4 место. В 2012 году онлайн-игра «Что?Где?Когда?» проводилась совместно с Ижевским государственным техническим университетом, где также принимала участие одна из команд первокурсников [3]. В анкетах прослеживается стабильное желание заниматься в творческих коллективах и секциях, участвовать в общественной жизни университета, совмещая учебную деятельность и работу.

В заключение следует отметить, что результаты социологических исследований помогают в работе кураторов учебных групп, заместителей деканов факультетов по раскрытию научного и творческого потенциала студентов, позволяют осуществлять мониторинг студенческого контингента с целью наблюдения, оценивания и прогноза. Близость результатов многолетних опросов по определенным показателям дает принципиальную возможность считать такие результаты достоверными.

Список литературы

1. Добренков В.И., Кравченко А.И. Методы социологического исследования. М.: ИНФРА-М, 2004. 768 с.
2. Управление факультетом / под ред. С.Д. Резника. М.: ИНФРА-М, 2008. 696 с.
3. Бочаров С.М., Тархов Н.С., Тер-Данилов Р.А. Информационно-коммуникационные технологии как неотъемлемая часть при подготовке специалистов для оборонных отраслей промышленности // Известия ТулГУ. Технические науки. Серия «Проблемы специального машиностроения». Вып.11: в 2-х ч. Ч.2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. С. 246-250.

Тархов Николай Сергеевич, канд. техн. наук, доц., pbs.tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

SOCIOLOGICAL RESEARCH STUDENTS FIRST COURSE - PART OF EXTRACURRICULAR WORK IN HIGH SCHOOL

N.S. Tarhov

Considered results of sociological research first-year students of the Faculty of Automatic Control Systems TSU.

Key words: opinion poll, survey, extracurricular educational work.

Tarhov Nikolay Sergeevich, candidate of technical science, docent, pbs.tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

СОЦИАЛЬНЫЕ СЕТИ КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОФОРИЕНТАЦИИ

С.В. Антоненко

В статье рассмотрен вопрос продвижения бренда образовательного учреждения и образовательных услуг в Интернет-ресурсах. Предложен метод использования социальных сетей для привлечения широкой аудитории абитуриентов.

Ключевые слова: профессиональная ориентация, продвижение в социальных сетях, маркетинг образовательных услуг.

В настоящее время кризис высшего технического образования, несмотря на усилия педагогического состава вузов, продолжает усугубляться. К причинам сложившейся ситуации можно отнести престижность и моду на образование гуманитарного и экономического профиля, малое количество промышленных и производственных предприятий, которые испытывают потребность в выпускниках вузов, быстрое развитие вычислительной техники и технологий, требующих значительного количества специалистов информационного направления [1].

Сегодня профориентация понимается как деятельность, направленная на помощь в выборе профессии через организацию процесса определения индивидом вида трудовой деятельности, в которой он хочет себя проявить; оказание консультационной помощи в осознании им склонностей и способностей к этому виду деятельности; предоставление информации о каналах и средствах приобретения знаний, умений и навыков для овладения профессией.

На сегодняшний день рынок образовательных услуг активно развивается и расширяется. Учебные заведения рекламируют свои образовательные услуги, что способствует конкурентоспособности образовательных учреждений, так как потребители становятся более информированные в вопросах, касающихся выбора образовательного учреждения. Целевая аудитория становится более требовательная. Именно поэтому необходимо особое внимание уделять продвижению образовательного учреждения.

Современные технологии привлечения студентов в вузы позволяют не только увеличить число поступающих в вузы, но и повысить их качественный уровень.

Способы привлечения абитуриентов за счет разовых визитов в школы преподавателей Дни открытых дверей, в последнее время показывают свою неэффективность. Также является неэффективной прямая реклама в интернете. Большой эффект дает скрытая сопутствующая реклама, т.е. когда предлагается контент со встроенной в него контекстной рекламой.

Применение различных подходов к продвижению вуза, планы на

будущее развитие и обновление образовательных услуг, подкрепленное маркетинговыми исследованиями с учетом требований работодателей, их видения и пожеланий относительно профессиональных навыков выпускников, организация рекламной деятельности и продвижение образовательных услуг является главным в вопросе повышения статуса образовательного учреждения.

По данным TNS (международная исследовательская группа) в 2013 году социальные сети являются одним из наиболее популярных интернет-ресурсов (около 80%). В зависимости от региона пользователи тратят на социальные сети от 30 до 41% от всего времени, проведенного в интернете. При этом больше времени в социальных сетях проводят жители городов с численностью населения менее 100 тыс. - 41%[5].

За март 2013 года в топ-5 самых популярных ресурсов Интернета в России по показателю среднесуточной аудитории вошли Яндекс (35 проектов, аудитория 30,7 млн. чел.), Mail.ru (31 проект, аудитории 28 млн. чел.), Vk.com (аудитория 27,9 млн. чел.), Odnoklassniki.ru (19 млн. чел.) и Google (ru+com, 13,6 млн. чел.).

За год возросло количество «мобильных» пользователей (использующих мобильные устройства для выхода в интернет) на 48% в городах с населением от 100 до 799 тысяч жителей, на 45% в Москве и на 34% в других городах-миллионниках. Аудитория мобильного интернета составила 18,4 млн. Большинство пользователей мобильного интернета (49%) выходят в сеть с помощью смартфонов. За 2012 год доля обычных сотовых телефонов сократилась в полтора раза и составила 34%. Доля планшетов, наоборот, выросла — с 6% до 16% [5].

Больше всего пользователей интернета в возрастной группе от 25 до 44 лет. Эта категория составляет 48% пользователей в малых городах и 46% от всех пользователей Москвы. Среди тех, кто ежедневно выходят в Сеть 76% составляет молодежь в возрасте от 18 до 24 лет.

Социальная сеть – инструмент, объединяющий по интересам людей, которые генерируют свой контент. С этим контентом необходимо работать при организации маркетинга. Специалист по работе в социальных сетях собирает клиентов в сообщества и вступает с ними в коммуникацию, обсуждение. Традиционные каналы коммуникации неизбежно теряют свою эффективность. Все это заставляет искать новые пути продвижения услуг на рынке и практика вовлечения абитуриента в общее обсуждение проблемы или услуги становится особенно важной [4].

Развитие сети Интернет и информационных технологий позволило осуществлять работу по продвижению образовательных услуг с использованием образовательных порталов на базе различных инструментов и методов, направленных на привлечение потенциальных потребителей образовательных услуг и формирования имиджа и репутации ВУЗа. Сейчас почти все крупные ВУЗы начали заниматься продвижением своих образо-

вательных услуг с помощью образовательных порталов [2].

Не менее актуальным является создание портала (веб-ресурса) кафедры, т.к. его использование позволяет повысить качество образовательных услуг. Как один из вариантов портала можно рассмотреть сайт кафедры «Приборы и биотехнические системы» (<http://pbstulgu.ru>). Данный ресурс дает возможность получить информацию о сотрудниках кафедры, учебную информацию для студентов, абитуриентов, а также обсудить интересные темы, посмотреть фото-отчеты с мероприятий и т.д.

Продвижение образовательных услуг включает комплекс мер по продвижению как сайта и портала, так и образовательных услуг в целом в сети. Продвижение в сети существенно отличается от известных нам ранее инструментов (газеты-журналы-радио-телевидение-Интернет) маркетинга и рекламы. В социальной сети мы говорим не о рекламе своих услуг, а обсуждаем с потребителем интересные его темы, в нашем случае – образование.

Отдельные подразделения ВУЗа (филиалы, институты, кафедры и др.) используют инструмент продвижения – социальные платформы. Необходимо отметить, что сегодня социальные сети стали незаменимым средством коммуникации. Социальные медиа – это технологии и методы, которые позволяют пользователям делиться личными мнениями, контентом (текст, изображения, аудио, видео), а также обмениваться наблюдениями и взглядами. Могут быть выделены следующие цели продвижения вуза в социальных сетях [3]:

- усиление присутствия бренда вуза на социальных платформах;
- увеличения трафика сайта вуза;
- усиление положительного имиджа вуза;
- формирование положительного отношения потребителей образовательных услуг.

Немаловажным является для будущих студентов мнение их родственников, друзей, а также школьных педагогов. Поэтому при продвижении вуза через социальные сети желательно придерживаться следующих правил:

- выбор социальной сети должен соответствовать запросам и потребностям целевой аудитории;

- контент в социальных медиа играет самую важную роль (поэтому посты должны быть тщательно выверенными, всегда оставаться политкорректными, предоставлять информацию, бесплатные ресурсы и передовой опыт);

- обновления контентов должны быть частыми и последовательными;
- все элементы профиля (фон, изображения и сообщения) должны последовательно отражать корпоративную культуру учебного заведения.

Очевидно, что с каждым годом значение продвижения в системе образования будет увеличиваться, что связано с ростом рынка образова-

тельных услуг. Вузы будут конкурентоспособными только при наличии сильного бренда, который предполагает положительный имидж образовательного учреждения и высокий уровень корпоративной культуры. Дальнейшие исследования в области формирования бренда вуза будут чрезвычайно актуальными и востребованными.

Список литературы

1. Ермолаев Ю.В. Некоторые проблемы технического образования // Современные наукоемкие технологии. 2005. №1. С. 53-54.
2. Воробьева А.М. Модели продвижения образовательных услуг в системе интернет-маркетинга // Журнал СевКавГТИ. 2012. Вып. 12. С. 57-62.
3. Лухменева Е.П., Калиева О.М. Особенности формирования и продвижения бренда вуза // Вестник ОГУ. 2012. №13 (149). С. 228-231.
4. Е. М. Бакланова. Эффективный маркетинг образовательных услуг в социальных сетях. Вопросы современной науки и практики. 2011. №3(34). С. 111-115.
5. Сайт «Бизнес и интернет» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.bizhit.ru/index/users_count/0-151, свободный. – Загл. с экрана.

Антоненко Светлана Валентиновна, канд. биол. наук, доц., antonenko-sw@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

SOCIAL NETWORKING AS A TOOL FOR CAREER GUIDANCE

S.V. Antonenko

In the article the question of brand promotion of educational institutions and educational services in the Internet resources. We propose a method of using social networks to attract a wide audience of students.

Key words: career guidance, promotion of social networks, marketing educational services.

Svetlana Antonenko, candidate of biological sciences, docent, antonenko-sw@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ – ВЫСОКОЕ КАЧЕСТВО И ЭФФЕКТИВНОСТЬ

М.Б. Богданов, Н.С. Тархов

Рассмотрены вопросы повышения качества при подготовке и выполнении студентами выпускных квалификационных работ дипломированного специалиста.

Ключевые слова: выпускная квалификационная работа, преддипломная практика, календарный план выполнения ВКР, итоговая государственная аттестация выпускника.

Итоговой стадией обучения в высшем учебном заведении являются подготовка и защита выпускных квалификационных работ (ВКР) для получения квалификации дипломированного специалиста и степени бакалавра и магистра. По качеству ВКР и его защите судят об уровне подготовки выпускников, а это, в свою очередь, является важнейшим фактором оценки престижа вуза. Далее речь пойдет о подготовке и выполнении дипломных проектов (ДП), т.к. эта категория выпускников, на данный момент времени, является наиболее многочисленной. Основные цели дипломного проекта: систематизация, закрепление и расширение теоретических и практических знаний студентов по избранной специальности; развитие навыков ведения самостоятельной работы и овладение методикой исследования при решении определенных проблем в дипломном проекте; определение уровня теоретических и практических знаний студентов, а также умение применять их для решения конкретных практических задач [1].

В Тульском государственном университете порядок подготовки и защиты ВКР осуществляется в соответствии с разработанным стандартом [2]. Дипломный проект (работа) может выполняться студентом как в ТулГУ, так и на предприятиях, в организациях и учреждениях, где существуют для этого необходимые условия. Тема работы должна быть сформулирована в период практики, предшествующей дипломному проектированию. Не позднее, чем в течение первых двух недель дипломного проектирования, тема, руководитель и консультанты дипломного проекта (работы) закрепляются за студентом приказом ректора ТулГУ.

В соответствии с Методическими указаниями, разработанными на кафедре «Приборы и биотехнические системы» [3], готовиться к выполнению ДП студент должен начинать в конце девятого семестра, когда на кафедре утверждаются руководители ДП. Во время подготовки к прохождению преддипломной практики студенту необходимо определиться с при-

мерной темой ДП, согласовать ее с руководителем и приступить к выполнению патентно-библиографического поиска по теме ДП.

Во время прохождения преддипломной практики, студент проводит сбор материала для ДП, знакомится с конкретным прибором или системой.

В десятом семестре студент получает окончательно сформированное задание на ДП, включающее задание по основному разделу, задание по экономическому разделу и задание по разделу техники безопасности и охраны труда и календарный план выполнения дипломного проекта, в котором следует предусмотреть следующие виды работ:

1. Поиск патентов, авторских свидетельств на изобретения и подбор литературы по теме проекта;
2. Изучение соответствующих разделов рекомендованной руководителем и найденной самостоятельно литературы, описаний патентов и авторских свидетельств и использование полученной информации для решения поставленных в задании задач;
3. Последовательное выполнение расчетов по теме ДП и их анализ;
4. Оформление чертежей и пояснительной записки;
5. Представление пояснительной записки и чертежей руководителю, получение отзыва руководителя и анализ этого отзыва;
6. Представление пояснительной записки, чертежей и отзыва руководителя рецензенту, получение рецензии и её анализ;
7. Подготовка к защите дипломного проекта перед государственной экзаменационной комиссией.

Студент должен представить готовый дипломный проект на отзыв руководителю и на рецензию не позднее чем за три дня до защиты.

После рецензирования выполненный проект с отзывами руководителя и рецензента передается на утверждение заведующему выпускающей кафедрой.

Материалы дипломного проекта включают пояснительную записку и графическую часть (чертежи, графики, схемы, и.т.п.). В пояснительной записке дается обоснование актуальности темы, излагается выбор и обоснование конструкций, схем и алгоритмов, содержатся расчеты и пояснения.

Материал пояснительной записки должен быть изложен кратко и логично. Пояснительная записка должна содержать необходимые иллюстрации, эскизы, графики, диаграммы, схемы, таблицы и т.д., выполненные в процессе работы по теме. Включение в пояснительную записку материалов справочного характера допускается лишь в исключительных случаях, когда без этого невозможно выполнить расчет, сделать вывод и так далее, т.е. когда просто ссылка на соответствующие источники недостаточна. Объем

включаемого справочного материала должен быть минимально необходимым.

Если в записке необходимо привести значительный объем графического или справочного материала, его следует выносить в приложение, оставляя в тексте записки ссылки на соответствующие материалы приложения.

Содержание в записке материала описательного характера: введение, обзор и анализ известных решений и т.д. должно быть кратким и составлять не более 20%. Основная часть (конструкторская и технологическая) должна составлять не менее 45% и в ней должен быть представлен основной объем расчетов, экономическая - 15%, охрана труда и техника безопасности - 20% от общего объема пояснительной записки.

Дипломный проект также может включать приложение, макетный образец, отдельные элементы проектируемого прибора или аппарата, справку, подтверждающую подачу заявки на выдачу патента на предполагаемое изобретение, патент на изобретение, акт о внедрении каких-либо результатов дипломного проекта на предприятии, учреждении или их использовании в учебном процессе.

Статистические сведения за последние 7 лет по выпускаемым специалистам трех специальностей кафедры ПБС: 200100 «Приборостроение», 200401 «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» и 200402 «Инженерное дело в медико-биологической практике» представлены в таблице.

Из анализа табличных данных следует, что в текущее году нет выпускников, получивших дипломы с отличием, хуже всего ситуация по специальности 200100, где к тому же отмечается ухудшение результатов государственного экзамена. Если учесть проходной балл при поступлении, то прослеживается определенная закономерность. В 2009 и 2011гг. – максимальное количество дипломов с отличием и хороший средний балл на государственных экзаменах при достаточно высоких проходных баллах при поступлении. Это видно на представленном рисунке. В связи с этим на первый план выступает роль руководителя ВКР по улучшению качества представляемых на защиту материалов, подготовке доклада выпускника, что в целом улучшит полученные результаты, т.к. средний балл у большинства студентов за период обучения находится в интервале 3.5-4. Вместе с тем, квалификация преподавателей с каждым годом повышается. В настоящее время в России средний возраст кандидатов наук – 53 года, докторов наук – 61 год [4]. Кафедре в текущем году исполняется 15 лет и средний возраст примерно такой же, как и по стране, однако более половины кандидатов наук имеют аттестаты «доцентов», все преподаватели

имеют патенты, статьи в центральных журналах, прошли курсы повышения квалификации и в среднем, по отчётам за пятилетний период работы, каждый был руководителем ВКР у порядка 20 студентов.

**Статистические сведения по выпускаемым специалистам
кафедры ПБС**

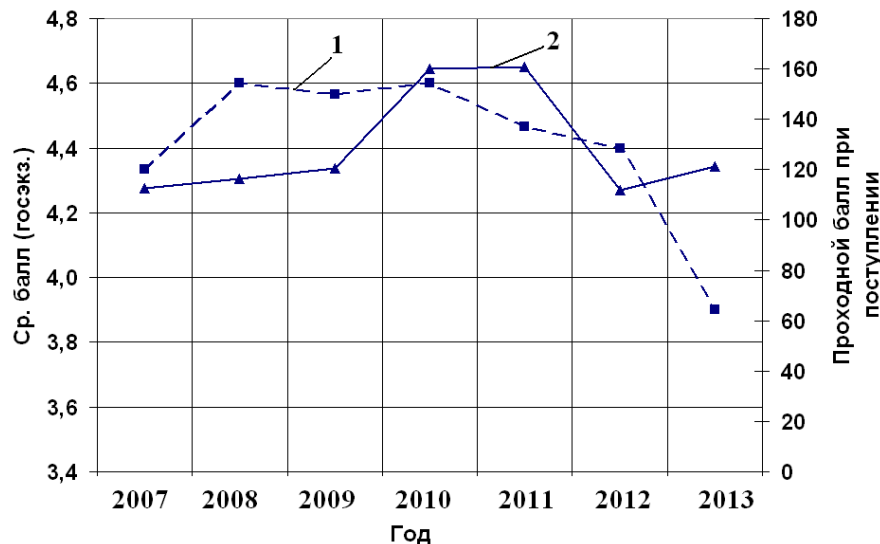
Год вы- пус- ка	Специ- аль- ность	Кол-во студ. выпуск/ при пост. (бюдж.)	Оценки на за- щи- те** отл/хор/ уд/неуд	Ср. балл (гос. экз.)	Темы ДП,			Дипл. с отл.	Прох. балл при пост.
					предл. студ.	по за- явкам предпр.	в обл. фунд. и прикл. научн. иссл.		
2013	200100	10/20	1/0/7/2	3.2	0	0	5	0	116
	200401	10/11	5/2/2	3.8	2	2	6	0	130
	200402	6/11	5/1/0	4.7	0	0	6	0	118
2012	200100	10/20	2/5/3	3.9	0	1	0	0	111
	200401	8/12	2/1/3	4.4	0	0	0	0	116
	200402	9/11	7/2/0	4.9	1	0	0	3	109
2011	200100	7/20	1/1/2	4	0	0	1	0	164
	200401	10/12	4/4/2	4.4	0	1	4	2	160
	200402	10/11	2/3/2	5	0	1	4	2	158
2010	200100	11/17	4/3/3	4.4	4	0	0	1	164
	200401	4/9	2/1/1	4.5	2	0	0	0	174
	200402	8/9	5/0/2	4.9	0	2	0	1	142
2009	200100	12/22	3/5/1	3.9	0	2	1	0	115
	200401	9/12	4/3/2	4.8	0	1	2	2	121
	200402	14*/11	7/5/2	5	2	6	2	2	126
2008	200100	9/18	2/0/2	3.9	0	2	0	0	нет свед.
	200401	11/13	6/4/1	4.9	0	1	0	1	нет свед.
	200402	11/12	6/4/1	5	0	1	0	1	нет свед.
2007	200100	6/18	1/2/3	3.5	0	1	0	0	105
	200401	8/13	3/5/0	4.8	3	0	0	2	126
	200402	11/12	4/2/5	4.7	0	0	0	1	107

*- с учетом студентов, обучавшихся на дополнительных местах;

** - без учета защитившихся по продлению сессии.

Это позволило в последнее время увеличить количество дипломных проектов, выполненных в области фундаментальных и прикладных научных исследований и комплексных. В связи с широким применением микропроцессоров и выбором их при разработке электрических принципиальных схем приборов и устройств некоторые проекты содержат програм-

мы, разработанные студентами для их работы самостоятельно. С другой стороны, на наш взгляд, необходимо улучшить качество преддипломной практики, т.к. мало тем, выполнено по заявкам предприятий. Следует отметить и низкую активность студентов по самостоятельному предложению тем ДП. В отчетах председателя ГАК практически отсутствуют предложения по внедрению результатов проектирования и рекомендации по участию в конкурсах и выставках.



***Зависимость между средним баллом на госэкзамене (1)
и проходным баллом при поступлении (2)
(взяты усреднённые значения трёх специальностей)***

Вместе с тем, в последние годы увеличилось количество опубликованных дипломниками в соавторстве с их руководителями статей и тезисов докладов [5], они чаще стали выступать на различного уровня НТК. Но это относится, в основном, к отличникам. Слабоуспевающие студенты требуют к себе повышенного внимания руководителя. В этой связи необходимо также улучшать на кафедре НИРС и развивать сотрудничество с другими кафедрами для решения общих теоретических и практических задач [6]. Так, сотрудничество с кафедрой «Хирургические болезни – 1» ТулГУ в 2008-2010гг. позволило реализовать часть дипломных проектов по специальностям 200401 и 200402 по предложению преподавателей данной кафедры.

В целях повышения качества дипломного проектирования целесообразно обучать студентов специальному курсу «Дипломное проектирование», в рамках которого выпускники отрабатывают методологию подготовки дипломного проекта.

В заключение следует отметить - необходимо, чтобы будущий российский корпус инженерно-технических специалистов соответствовал своему предназначению быть двигателем экономического и социального

прогресса общества, а техническое образование стало ключевым фактором этого развития.

Список литературы

1. Управление факультетом: учебник / под ред. С.Д. Резника. М.: ИНФРА-М, 2008. 696с.
2. СТ ТулГУ 8.2.4-01-2010 [Электронный ресурс] // Итоговая государственная аттестация выпускника: [сайт]. [2010]. URL: <http://tsu.tula.ru/docs/> (дата обращения 1.07.2013).
3. Тархов Н.С., Ивахно Н.В., Богданов М.Б., Смирнов В.А. Методические указания по выполнению выпускной квалификационной работы (ВКР) для студентов очной формы обучения. Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. 32с.
4. Савельев А.Я. Проблемы высшего образования Российской Федерации. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 284с.
5. Тархов Н.С., Трохина И.В. Антенны-аппликаторы для радиотермометрии // Известия ТулГУ. Технические науки. Серия «Проблемы специального машиностроения». Вып.11. Ч.2, Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. С. 30-40.
6. Тархов Н.С., Коржук Н.Л. Организация технического творчества в рамках НИРС на разнопрофильных кафедрах/ Техническое творчество как средство развития конкурентоспособности и повышения качества инженерной деятельности: сб. тр. IV-й Всерос. науч.-практ. конф./Под ред. Ю.Е. Жужговой. Вып. 3 (186), Екатеринбург: Изд-во УрГУПС. 2012. С.35-38.

Богданов Максим Борисович, канд. техн. наук, доц., pbs.tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Тархов Николай Сергеевич, канд. техн. наук, доц., pbs.tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

TRAINING - HIGH QUALITY AND EFFICIENCY

M.B. Bogdanov, N.S. Tarhov

The problems of improving the quality of the preparation and execution of the final qualifying students graduate work.

Key words: Graduate work, pre-diploma practice schedule of the WRC, the final state certification of graduates.

Bogdanov Maksim Borisovich, candidate of technical science, docent, pbs.tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Tarhov Nikolay Sergeevich, candidate of technical science, docent, pbs.tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭПИЛЕПСИИ

А.А. Индюхин, А.Ф. Индюхин, Н.Л. Коржук

В составе системы ЭЭГ-диагностики неврологических нарушений предусматривается выявление признаков эпилепсии. При появлении спайков, комплекса «острая-медленная волна», замедлении ритма измерение периодов сигнала позволяет диагностировать патологию. Приведена математическая модель и результаты моделирования.

Ключевые слова: Электроэнцефалограмма, эпилепсия, математическая модель, период сигнала.

Грубой патологией (ГП) нервной системы следует считать, прежде всего, эпилепсию [1]. Причиной эпилепсии могут быть анатомические дефекты развития мозга, опухолевые и воспалительные процессы, последствия черепно-мозговых травм, метаболические нарушения.

Болезнь проявляется периодическими приступами, возникающими часто на фоне общего благополучия и отсутствия клинической симптоматики. Врач чаще всего не может непосредственно наблюдать эпилептический припадок, особенно у впервые обратившихся больных, при этом не исключена и симуляция. Истинный припадок часто сопровождает амнезия, больной не может описать свое состояние. Электроэнцефалографическое (ЭЭГ) исследование приобретает в этих условиях особенно важное диагностическое значение, хотя оно и не является истиной в последней инстанции. Существует целый ряд дополнительных методов диагностики, каждый из которых имеет свои недостатки. Так, компьютерная томография дает значительную лучевую нагрузку (имеет ограниченное применение в педиатрии), плохо выявляет патологию мягких тканей. Магнитно-резонансная томография достаточно дорога, неэффективна в случае неконтролируемых движений, клаустрофобии пациента, при известковании тканей мозга [2].

Регистрация электрической активности клеток мозга делает ЭЭГ самым важным исследованием при диагностике эпилепсии. При эпилепсии на ЭЭГ появляются специфические изменения (эпилептическая активность) в виде разрядов острых волн и пиков более высокой амплитуды, чем обычные волны. Они могут быть как генерализованными - комплексы «пик-волна» во всех областях мозга, так и очаговыми - только на определенных, ограниченных участках мозга.

Многие изменения на ЭЭГ являются неспецифическими, только на основании выявленных изменений электрической активности нельзя гово-

ритель об эпилепсии, с другой стороны, нельзя исключить этот диагноз при нормальной ЭЭГ. Эпилептическая активность на ЭЭГ регулярно выявляется только у 20-30% людей с эпилепсией, поэтому принято говорить об эпилептиформной активности [1].

Интерпретация изменений биоэлектрической активности мозга требует огромного опыта и даже таланта, вследствие чего не может быть полностью алгоритмизирована. Источником сходных изменений ЭЭГ могут быть движения глаз, глотание, пульсация сосудов, дыхание, движение электрода, электростатический разряд и другие немозговые причины. Значительно влияет на вид ЭЭГ возраст пациента.

В связи с вышеизложенным, в задачи скрининговой системы диагностики (ССД) не входит постановка диагноза конкретного заболевания, а просто выявление на ЭЭГ признаков, которые могут, в том числе, свидетельствовать о наличии у пациента ГП нервной системы. Как бы ни была низка вероятность выявления такого серьезного заболевания, как эпилепсия, пренебрегать ею в условиях скринингового обследования не следует.

До 80 % ЭЭГ-обследований направлены на выявление эпилептиформной активности [1]. С медицинской точки зрения, главной задачей ЭЭГ является именно выявление ГП, а поиск признаков других нарушений на фоне высокоамплитудных эпифеноменов теряет смысл, поскольку они искажают все возможные соотношения (и амплитудные, и частотные), присутствующие «спокойной» ЭЭГ.

Задача автоматизации обнаружения спайков, замедления основного ритма и комплексов «острая – медленная волна» (КОМВ) может быть решена применением периодометрических методов в реальном времени [2, 3], которые показали более высокую эффективность по сравнению с корреляционными методами [4].

Для выявления ГП в ССД анализируется поступающий с усилителя ЭЭГ сигнал и его производная (рис. 1).

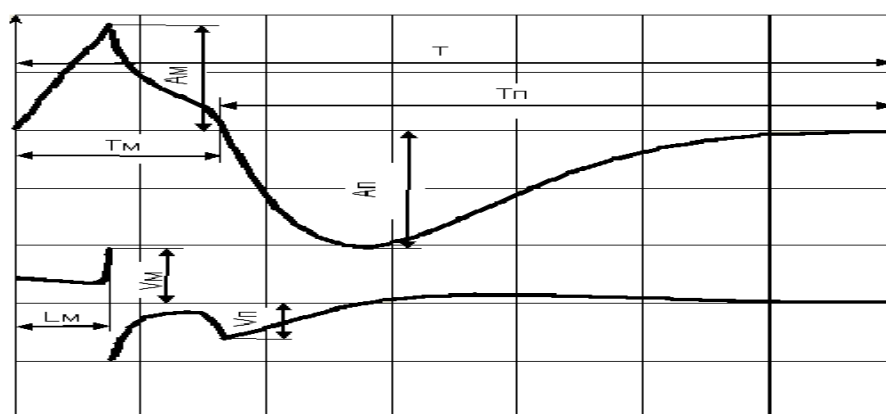


Рис. 1. Графики одного периода изменения сигнала ЭЭГ и его производной при наличии комплекса «острая – медленная волна». Показаны измеряемые показатели (пояснения в тексте). Для сигнала ЭЭГ (верхний график) отрицательное отклонение – вверх

Рассматриваются такие параметры, как T - период колебания; T_M - время пребывания сигнала в отрицательной фазе; T_{Π} - время пребывания сигнала в положительной фазе; A_M - максимальное значение сигнала в отрицательной фазе; A_{Π} - максимальное значение сигнала в положительной фазе; V_M - максимальное значение производной на участке отрицательной фазы сигнала, V_{Π} - максимальное значение производной на участке положительной фазы; L_M - промежуток времени от перехода сигнала в отрицательную фазу до достижения максимума V_M .

Проявления ГП - спайки и КОМВ, можно обнаружить в первом случае - по малому периоду колебаний T (менее 10 мс) и высокой амплитуде A_M и A_{Π} , во втором случае - по разнице времени пребывания в отрицательной ($T_M < 90$ мс) и положительной фазе ($T_{\Pi} > 150$ мс) в течение одного периода T . Наличие «острых волн» в ЭЭГ определяется по нахождению максимума производной в интервале от 0,25 до 0,75 T_M . На рис. 1 показано, что на участке отрицательной фазы производная имеет максимум не в начале отрезка T_M , а ближе к середине, что говорит об «острой волне», в то время как на участке положительной фазы сигнал изменяется плавно, максимум производной совпадает с началом T_{Π} .

Высокая амплитуда сигнала A_M и A_{Π} не является сама по себе признаком ГП, однако во избежание риска при скрининговом обследовании также должна считаться поводом для прекращения обследования.

Поскольку отладка механизма анализа ГП на реальных сигналах по понятным причинам затруднительна и даже прямо противоречит законодательству об охране здоровья, необходимо было разработать математическую модель патологических феноменов и тестирующее программное обеспечение. Рассмотрим полученные уравнения.

1. Замедление основного ритма.

$$U_{BX} = 30 \sin \varphi(t),$$

где $\varphi(t)$ - фаза колебаний,

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \int_0^t 2\pi \Phi(t) dt;$$

$\varphi_0 = 0$ - начальная фаза;

$$\Phi(t) = \begin{cases} 10, & \text{если } t < 0,05 \text{ с;} \\ 10 - \frac{7(t - 0,05)}{0,95}, & \text{если } 0,05 \text{ с} < t < 1,0 \text{ с;} \\ 3, & \text{если } t > 1,0 \text{ с.} \end{cases}$$

2. Комплекс «острая - медленная волна»

$$U_{BX} = \begin{cases} 30 \cdot \sin \varphi(t) \cdot \sin \gamma(t), & \text{если } t < 0,5 \text{ с;} \\ \left(80 - 80 \frac{t - 0,75}{0,25} \right) \cdot \sin \varphi_1(t), & \text{если } 0,5 \text{ с} < t < 0,75 \text{ с;} \\ 30 \cdot \sin \varphi_2(t) \cdot \sin \gamma_2(t), & \text{если } t > 0,75 \text{ с.} \end{cases}$$

$$\varphi(t) = \frac{2\pi \cdot \left[t - 0,1 \cdot E\left(\frac{t}{0,1}\right) \right]}{0,1}; \quad \gamma(t) = \frac{2\pi \cdot (t + 0,25)}{5,0};$$

$$\varphi_1(t) = \int_{0,5}^{0,75} \Phi_2(t) dt; \quad \Phi_2(t) = \frac{6\pi \cdot (0,75 - t)^2}{0,0625};$$

$$\varphi_2(t) = \frac{2\pi \cdot \left[t - 0,1 \cdot E\left(\frac{t}{0,1}\right) \right]}{0,1 + \pi};$$

$$\gamma_2(t) = \frac{2\pi \cdot (t - 0,75)}{5,0}.$$

3. Спайк

$$U_{BX} = \begin{cases} 30 \cdot \sin \varphi(t) \cdot \sin \gamma(t), & \text{если } t < 0,20 \text{ с} \vee t > 0,21 \text{ с;} \\ 80 \cdot \sin \gamma_3(t), & \text{если } 0,20 \text{ с} < t < 0,21 \text{ с,} \end{cases}$$

$$\varphi(t) = \frac{2\pi \cdot \left[t - 0,1 \cdot E\left(\frac{t}{0,1}\right) \right]}{0,1}; \quad \gamma(t) = \frac{2\pi \cdot (t + 0,25)}{5,0}; \quad \gamma_3(t) = \frac{2\pi \cdot (t - 0,20)}{10}.$$

4. Острые волны.

$$U_{BX} = \frac{30 \cdot \sin \varphi(t) \cdot \sin \gamma(t)}{\cos \gamma_2(t)}; \quad \varphi(t) = \frac{2\pi \cdot \left[t - 0,125 \cdot E\left(\frac{t}{0,125}\right) \right]}{0,125};$$

$$\gamma(t) = \frac{2\pi \cdot (t + 0,25)}{8,0}; \quad \gamma_2(t) = \begin{cases} 0,40\gamma(t), & \text{если } \gamma(t) < \frac{\pi}{2}; \\ 1,40\gamma(t) + \pi, & \text{если } \frac{\pi}{2} < \gamma(t) < \pi; \\ 0,85\gamma(t) + \pi, & \text{если } \pi < \gamma(t) < \frac{3\pi}{2}; \\ 1,47\gamma(t) + \frac{3\pi}{2}, & \text{если } \frac{3\pi}{2} < \gamma(t) < 2\pi. \end{cases}$$

По приведенным уравнениям составлена программа моделирования на языке Visual Basic – 6.0. Полученные сигналы приведены на рис. 2.

Разработанная программа моделирования тестового сигнала может быть использована для отработки программного обеспечения ССД неврологических нарушений, а так же в учебных целях.

Лимитирующим объем исследований ССД является блок анализа эпилептиморфных феноменов, поскольку при их обнаружении работа системы прекращается. Функциональная схема этого блока представлена на рис. 3.

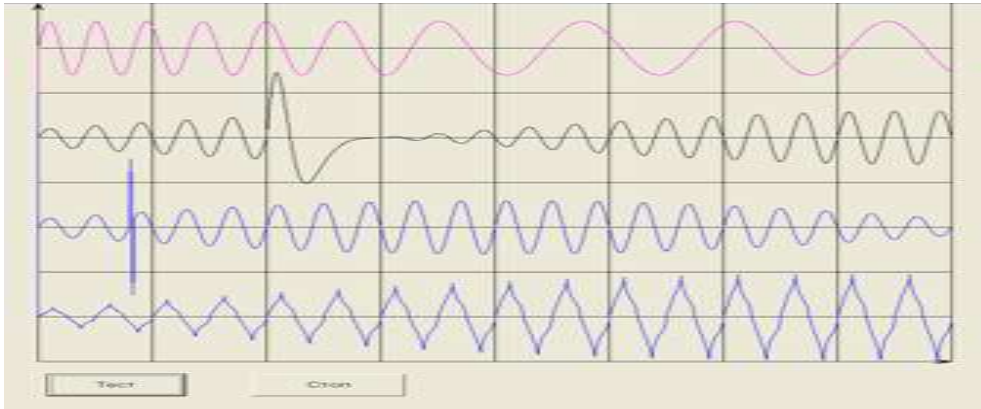


Рис. 2. Результаты моделирования тестового сигнала.
 По порядку сверху вниз: замедление доминирующего ритма, комплекс «острая – медленная волна», одиночный спайк, острые волны.

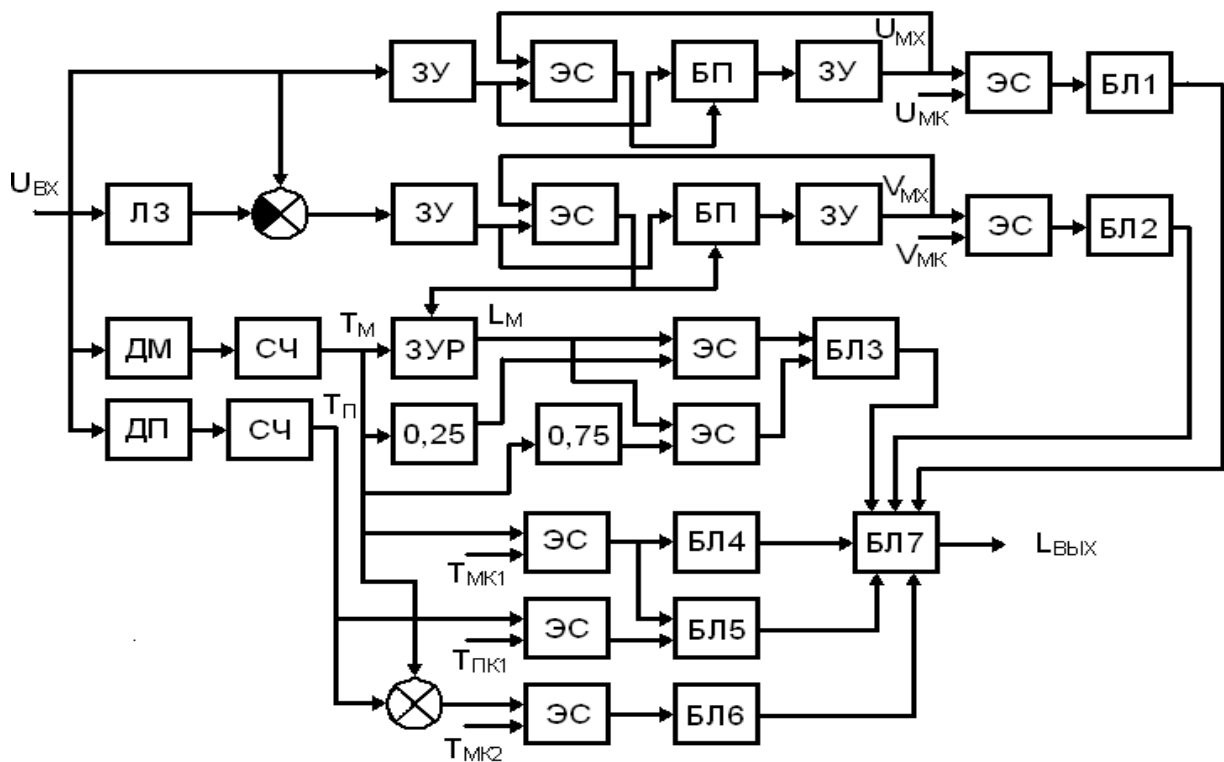


Рис. 3. Функциональная схема блока анализа эпилептиморфных феноменов: $U_{ВХ}$ – сигнал с выхода усилителя ЭЭГ; ДМ – датчик пребывания входного сигнала в положительной фазе; ДП – датчик пребывания входного сигнала в отрицательной фазе; СЧ – счётчик; ЗУ – запоминающее устройство; ЗУР – управляемое запоминающее устройство; ЭС – элемент сравнения; ЛЗ – линия задержки; БП – блок переключения; БЛ1 – БЛ7 – блоки логики; $L_{ВЫХ}$ – результирующее заключение

Представленная на рис. 3 схема обеспечивает контроль наличия в сигнале ЭЭГ вышеописанных феноменов. Важнейшим параметром следует считать, в первую очередь, скорость нарастания сигнала. Из входного сигнала при помощи ЛЗ формируется сигнал производной, который запоминается в ЗУ. В элементе сравнения ЭС текущее значение скорости сравнивается с запомненным в следующем ЗУ максимальным значением. В случае превышения текущего значения БП пропускает его в ЗУ, и происходит запоминание поочередно тех значений, которые оказываются в рассматриваемом интервале максимальными. После того, как интервал положительной или отрицательной фазы заканчивается, выбранное значение максимальной производной V_{MX} сравнивается при помощи элемента сравнения с заданным значением V_{MK} , и в случае, если оно превышает заданное значение, блок логики выводит сообщение о превышении скорости нарастания сигнала, о его высокочастотном характере. Кроме того, в тот же период положительной или отрицательной фазы определяется, где достигнут максимум производной. Это делается для того, чтобы установить, является волна острой или нет. Если волна острая, то максимум производной достигается не в начале или в конце отрезка, как у синусоиды, а в середине. В качестве контрольного интервала выбран интервал от $0,25T_i$ до $0,75T_i$, где T_i – время пребывания сигнала в одной фазе. Если максимум обнаружен в этом интервале, то выводится сообщение об острых волнах (БЛЗ). Наибольшая амплитуда сигнала U_{MX} контролируется практически по такой же схеме, что и скорость, сообщение формирует блок БЛ2.

Основные элементы блока - периодометрические: датчики ДМ и ДП и счетчики СЧ, которые считают время пребывания волны в положительной и отрицательной фазах.

Если время пребывания сигнала в положительной и отрицательной фазе суммарно оказывается минимальным, то делаем вывод, что волна является не только высокочастотной, но также и спайком.

Время положительной и отрицательной фазы суммируется и сравнивается с критическим значением T_{MK2} , после чего диагностируется спайк. Если время пребывания в положительной и отрицательной фазе значительно отличается, причем определено, что в минусовой фазе время полуволны соответствует колебанию частотой 6 Гц ($T_{MK3} > 80$ мс), а в положительной фазе сигнала полуволна соответствует колебанию частоты 3 Гц ($T_{MK1} > 160$ мс), то диагностируется комплекс «острая - медленная волна». Если время пребывания в положительной и отрицательной фазе достаточно большое, то это свидетельствует о наличии замедления доминирующего ритма. Замедление ритма предшествует эпилептическому припадку, когда доминирующий ритм, имеющий частоту (в среднем) 10 Гц, начинает замедляться и доходит до критической величины 3 Гц ($T_{MK2} > 330$ мс), в итоге он становится высокоамплитудным. При этом все остальные ритмы редуцируются, поэтому замедление доминирующего ритма доволь-

но легко диагностировать.

Составим математическую модель работы логического блока комплекса диагностики ГП. Комплекс выдает на экран микропроцессорного блока ССД сообщение об обнаруженных проявлениях судорожной активности.

Возможные варианты сообщений:

L_0 = « »;

L_1 = «Высокоамплитудная активность»;

L_2 = «Высокочастотная активность»;

L_3 = «Острые волны»;

L_4 = «Спайковая активность»;

L_5 = «Комплекс «Острая-медленная волна»»;

L_6 = «Замедление ритма»;

L_7 = «Исследование прекратить».

Формирование сообщений происходит в соответствии с уравнениями:

$$L_{B1} = \begin{cases} L_1, & \text{если } U_{MX} \geq U_{MK}; \\ L_0, & \text{если } U_{MX} < U_{MK}; \end{cases} \quad U_{MX} = \begin{cases} \max(U_{BXi} \in U_{BX\Pi}); \\ \max(-U_{BXi} \in U_{BXM}), \end{cases}$$

где L_{B1} – литерал, формируемый на выходе БЛ1; U_{BXi} – текущее значение входного сигнала; $U_{BX\Pi}$ – множество положительных значений входного сигнала (ДП=1); U_{BXM} – множество отрицательных значений входного сигнала (ДМ=1); U_{MK} – критическое значение входного сигнала, $U_{MK} = 250$ мкВ;

$$L_{B2} = \begin{cases} L_2, & \text{если } V_{MX} \geq V_{MK}; \\ L_0, & \text{если } V_{MX} < V_{MK}; \end{cases} \quad V_{MX} = \begin{cases} \max(V_{BXi} \in V_{BX\Pi}); \\ \max(-V_{BXi} \in V_{BXM}), \end{cases}$$

где L_{B2} – литерал, формируемый на выходе БЛ2; V_{BXi} – текущее значение скорости изменения входного сигнала; $V_{BX\Pi}$ – множество значений скорости изменения входного сигнала при положительных значениях входного сигнала (ДП=1); V_{BXM} – множество значений скорости изменения входного сигнала при отрицательных значениях входного сигнала (ДМ=1); V_{MK} – критическое значение скорости изменения входного сигнала, $V_{MK} = 50\,000$ мкВ/с;

$$L_{B3} = \begin{cases} L_3, & \text{если } 0,25T_M < L_M < 0,75T_M; \\ L_0, & \text{если } L_M < 0,25T_M \vee L_M > 0,75T_M; \end{cases}$$

где L_{B3} – литерал, формируемый на выходе БЛ3;

$$L_{B4} = \begin{cases} L_4, & \text{если } T_M \leq T_{MK1}; \\ L_0, & \text{если } T_M > T_{MK1}; \end{cases}$$

где L_{B4} – литерал, формируемый на выходе БЛ4; T_{MK1} – критическое значение полупериода входного сигнала, $T_{MK1} = 5$ мс;

$$L_{B5} = \begin{cases} L_5, & \text{если } T_M < T_{MK3} \wedge T_{II} > T_{PK1}; \\ L_0, & \text{если } T_M > T_{MK3} \vee T_{II} < T_{PK1}; \end{cases}$$

где L_{B5} – литерал, формируемый на выходе БЛ5; T_{MK3} – критическое значение периода отрицательного значения входного сигнала, $T_{MK3} = 80$ мс; T_{PK1} – критическое значение периода положительного значения входного сигнала, $T_{PK1} = 160$ мс;

$$L_{B6} = \begin{cases} L_6, & \text{если } T_M + T_{II} \geq T_{MK2}; \\ L_0, & \text{если } T_M + T_{II} < T_{MK2}; \end{cases}$$

где L_{B6} – литерал, формируемый на выходе БЛ6; T_{MK2} – критическое значение периода входного сигнала, $T_{MK2} = 330$ мс.

Формирование сообщений в блоке БЛ7 происходит по алгоритму, представленному на рис. 4.

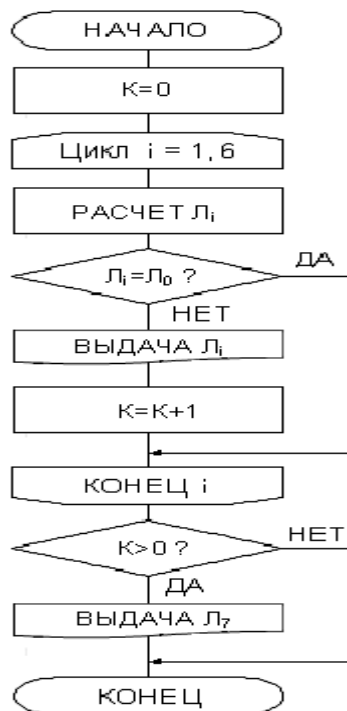


Рис. 4. Схема алгоритма работы блока логики БЛ7

Как видно из рис. 4, сообщение L_7 («Исследование прекратить») выдается в случае, если в любом подблоке БЛ1 – БЛ6 обнаружено одно из рассматриваемых проявлений ГП.

Таким образом, по результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Разработана структура блока анализа признаков ГП нервной системы на основе периодометрических методов.
2. Получена математическая модель и проведено цифровое моделирование тестовых сигналов, имитирующих эпилептиморфные феномены

в сигнале ЭЭГ.

3. Составлены математические модели и алгоритмы работы логического блока выявления патологических феноменов.

Список литературы

1. Карлов В.А. Эпилепсия. М.: Медицина, 1990. 336 с.
2. Корневский Н.А., Попечителей Е.П., Серегин С.П. Медицинские приборы, аппараты, системы и комплексы: учебник // Курск: ОАО «ИПП Курск», 2009. 986 с.
3. Корневский Н.А., Губанов В.В. Автоматический анализ электрофизиологических сигналов // Медицинская техника. 1995. № 1. С. 36 - 39.
4. Mishina L.M., Indyukhin A.A., Indyukhin A.F., Tarhov N.S. A subsystem for electroencephalographic diagnosis of epilepsy // Biomedical Engineering, 2012. Т. 46. № 1. Р. 21-24.

Индюхин Алексей Алексеевич, аспирант, induke705@mai.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Индюхин Алексей Федорович, канд. биолог. наук, доц., pbs.tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Коржук Николай Львович, канд. техн. наук, доц., pbs.tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

SOFTWARE OF ELECTROENCEPHALOGRAPHY DIAGNOSIS OF EPILEPSY

N.L. Korzhuk, A.F. Indyuhin, A.A. Indyuhin

As a part of system of EEG-diagnostics of neurologic violations identification of symptoms of epilepsy is provided. At emergence spikes, the «sharp-slow wave» complex, rhythm delay measurement of the periods of a signal allows to diagnose pathology. The mathematical model and results of modeling is given.

Key words: electroencephalogram, epilepsy, mathematical model, signal period.

Indyuhin Alexey Alexeevich, postgraduate, induke705@mai.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Indyuhin Alexey Fedorovich, candidate of biological science, docent, pbs.tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Korzhuk Nikolay Lvovich, candidate of technical science, docent, pbs.tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 681.2

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ЗАРУБЕЖНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ СНАРЯДОВ

М.Б. Богданов

В статье на примерах зарубежных программ по созданию управляемых артиллерийских снарядов анализируются особенности построения их навигационных систем.

Ключевые слова: управляемый артиллерийский снаряд, навигационная система.

В промышленно развитых странах ведутся активные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию управляемых средств поражения высокоточных комплексов оружия, в том числе и управляемых артиллерийских снарядов (УАС). Такие снаряды в калибре от 105мм до 155мм позволяют одним выстрелом поражать из штатных средств артиллерии важные цели на дистанциях до 130км. В случае вооруженного противостояния УАС дают значительное преимущество обладающей ими стороне, т.к. позволяют:

оперативно поражать на дальних дистанциях первоочередные цели (станции РЛС, мобильные ПВО, штабы и т.д.);

уничтожать противника, расположенного в непосредственной близости от дружественных войск, а также в условиях городской застройки при наличии гражданского населения;

вести успешное противодействие малым группам противника в ситуациях, характеризующихся отсутствием линии соприкосновения как таковой.

Наиболее известными и успешными зарубежными проектами по созданию УАС являются: Excalibur, ERGM, BTERM, Vulcano, LRLAP и GAM. В табл. 1 приведена краткая характеристика УАС, разрабатываемых в рамках перечисленных проектов [1, 2, 3, 4].

Следует отметить, что на вооружение принят только снаряд Excalibur M982 (модификаций Ia-1 и Ia-2), остальные модификации данного снаряда и другие УАС находятся на различной стадии разработки вплоть до летных испытаний.

Высокая точность и эффективность указанных УАС обеспечивается работой системы управления (СУ), которая корректирует полет снаряда и выводит его к цели под определенным углом. Важным элементом СУ является навигационная система (НС), основная задача которой заключается в обеспечении СУ информацией о текущих координатах (линейных и угловых) УАС и его параметрах движения (линейных и угловых скоростях).

От точности и своевременности указанной информации напрямую зависит отклонение УАС от цели, следовательно, и эффективность УАС. Очевидно, что работы по созданию НС для УАС являются востребованными и актуальными.

Таблица 1

Краткая характеристика наиболее известных УАС

УАС	Страна разработчик	Калибр	Максимальная дальность	КВО* от цели
Excalibur M982	США, Швеция	155 мм	60 км	от 6м до 20м
ERGM EX-171	США	127 мм	115 км	20м
BTERM	США	127 мм	115 км	20м
Vulcano	Италия	155 мм	80 км	20м
LRLAP	США	155 мм	130 км	-
GAM	Израиль	105 мм	23 км	10м

*КВО – круговое вероятное отклонение.

Целью данной работы является анализ особенностей построения навигационных систем, применяемых в системах управления зарубежных УАС.

Конструктивное место НС в составе УАС. Перечисленные в табл. 1 УАС имеют схожие черты: схема управления «утка» с 2 или 4 рулями, полет на начальном участке происходит по баллистической траектории, используется инерциально-спутниковая (INS/GPS) НС, УАС имеет высокую стоимость (для Excalibur M982, порядка, 25 000 – 45 000 \$). Как минимум в двух УАС (Excalibur M982 и ERGM EX-171) предусмотрено снижение частоты вращения корпуса снаряда или его части, где располагается аппаратура СУ.

На рис. 1 приведено устройство снаряда Excalibur M982 Block I [5].



Рис. 1. Устройство снаряда Excalibur M982 Block I

Для СУ необходимо информация о параметрах линейного движения центра масс УАС и его углового вращения вокруг центра масс, а из представленного примера видно, что элементы НС располагаются не в центре масс УАС, а в его носовой части. Это должно быть учтено при разработке алгоритмического обеспечения решения навигационной задачи.

Навигационные системы зарубежных УАС. Основными элементами инерциально-спутниковой НС являются: блок инерциальных чувствительных элементов (БИЧЭ), приемная аппаратура (ПА) спутниковой радионавигационной системы, цифровой навигационного вычислителя (ЦНВ). БИЧЭ, как правило, состоит из датчиков угловой скорости и акселерометров, выполненных по микромеханической технологии, так называемые, микромеханические гироскопы (ММГ) и микромеханические акселерометры (ММА) и собственного цифрового процессора. БИЧЭ предназначен для измерения параметров движения УАС: проекций угловой скорости и проекций линейного ускорения на оси, связанной с УАС системы координат. ПА состоит из антенны и собственного цифрового вычислителя, производящего обработку принятых антенной сигналов и выработку координат и линейных скоростей УАС. ЦНВ производит обработку сигналов БИЧЭ и ПА, вычисляет требуемые для СУ величины, например, текущие координаты УАС, его линейные и угловые скорости. В табл. 2 приведены сведения об используемых в различных УАС элементах НС [1-4, 6].

На рис. 2 приведен внешний вид БИЧЭ, применяемых в НС УАС.



а

б

в

Рис. 2. Внешний вид блоков инерциальных чувствительных элементов, применяемых в навигационных системах УАС:

а - HG 1930, б) SilMU02, в - навигационная система разработки Draper Laboratory совместно с ATK (1 – блок программирования полета, 2 – устройство защиты ПА от радиопомех, 3 – навигационный вычислитель, 4 – блок инерциальных чувствительных элементов, 6 – крышка)

Конструкцию и характеристики БИЧЭ для НС УАС рассмотрим на примере блока SilMU02, основные характеристики которого приведены в табл. 3 [7].

Таблица 2

Сведения об элементах навигационных систем зарубежных УАС

УАС	Разработчик УАС	Блок инерциальных чувствительных элементов	Приемная аппаратура сигналов спутниковой радионавигационной системы
Excalibur Block Ia-1 года разработки 2002г – 2006г	Raytheon Missile Systems (США), BAE Systems (Швеция)	HG 1930 (Honeywell Aerospace) стоимость ≈2200\$	L3 Interstate Electronics Corporation (вычислитель приемной аппаратуры), M/Acom (антенна приемной аппаратуры)
Excalibur Block Ia-2 года разработки 2006г – 2008г		SilMU02 (Atlantic Inertial Systems) стоимость ≈2500\$	
Excalibur Block Ib начало разработки 2006г	Raytheon Missile Systems (США)	Draper Laboratory совместно с ATK	
	ATK (США)		
ERGM EX-171	Raytheon Missile Systems (США)		
BTERM			
GAM	IMI (Израиль)	Pure Heart (IMI)	-

Таблица 3

Основные характеристики блока SilMU02, применяемого в НС УАС

Параметр	Каналы измерения угловой скорости	Каналы измерения линейного ускорения
Диапазон измерений	По оси 1 $\pm 9000^0/\text{с}$ По осям 2 и 3 $\pm 500^0/\text{с}$. Есть модификации с диапазоном измерений $\pm 14000^0/\text{с}$ по всем трем осям	От $\pm 15\text{g}$ до $\pm 100\text{g}$ по всем трем осям
Повторяемость нулевого сигнала (1σ)	$\leq 100^0/\text{ч}$	$\leq 10^{-3}\text{g}$
Нестабильность нулевого сигнала	$\leq 6^0/\text{ч}$	$\leq 0,5 \cdot 10^{-3}\text{g}$
Случайный шум	$\leq 0,5^0/\sqrt{\text{ч}}$	$\leq 0,5^m/\text{с}/\sqrt{\text{ч}}$
Повторяемость коэффициента передачи (1σ)	$\leq 500\text{ppm}$ (для диапазона $\pm 1000^0/\text{с}$)	$\leq 1500\text{ppm}$
Масса	$< 210\text{ грамм}$	
Напряжение питания	5 В	
Потребляемая мощность	$\leq 3,75\text{ Вт}$	

Блок SilMU02 относится к военной продукции, и для его приобретения требуется заявление конечного пользователя – документ на бланке организации с информацией о целях использования блока. В блоке использованы [8]: три ММА HS8000 фирмы Colibrus (Швейцария) и три ММГ, имеющих предположительно, те же чувствительные элементы, что и ММГ SiRRS02 (рис. 3).

ММА и ММГ вместе с платой микропроцессора упакованы в цилиндр, который в свою очередь закрепляется через амортизационную раму в прочном корпусе. На рис. 4 показан состав блока SilMU02. Элементы блока испытаны в соответствии с зарубежными военными стандартами [8]: на ударо и вибропрочность и устойчивость MIL-STD-883-E, на надежность MIL-HDBK-217. Жесткие условия эксплуатации на борту УАС накладывают особенные требования к методам определения основных характеристик блока. Например, нестабильность нулевого сигнала ММА при её определении с использованием вариации Алана в лабораторных условиях, составляет не более $0,5 \cdot 10^{-3}g$ (табл. 3).

При использовании стандартов серии MIL (от англ. military - военный, армейский) нестабильность определяется в течение: десятков часов непрерывной работы (рис. 5 а), при многократном включении/выключении, при хранении в течение нескольких дней в широком диапазоне температур от минус $55^{\circ}C$ до плюс $85^{\circ}C$, при многократных циклах температуры от минус $40^{\circ}C$ до плюс $125^{\circ}C$ и в конце при воздействии широкополосной случайной вибрации в диапазоне частот от 20Гц до 2000Гц со среднеквадратичным значением 20g (рис. 5 б). После обработки результатов испытаний оказывается, что в таких условиях нестабильность нулевого сигнала превышает паспортное значение (табл. 3) почти в 20 раз. Это необходимо учитывать на этапе выбора элементной базы.

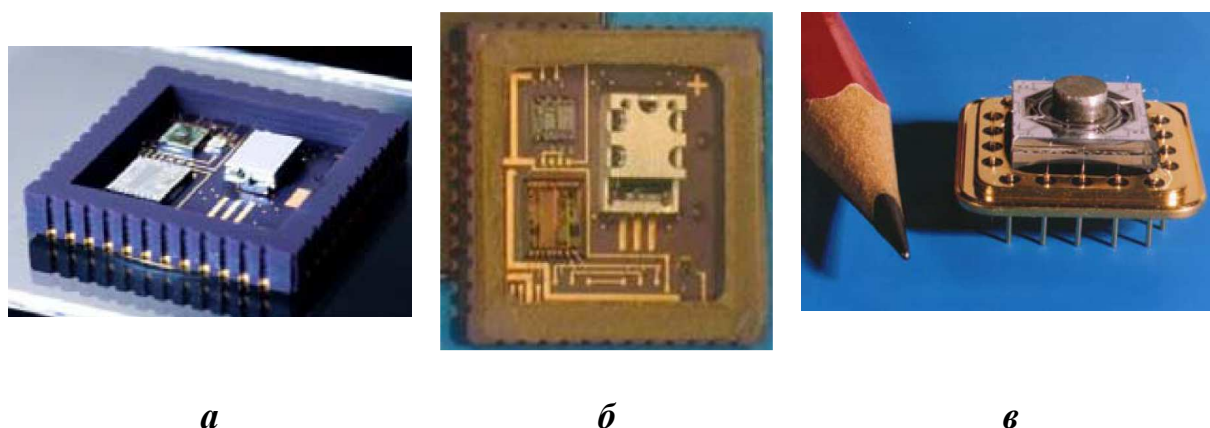


Рис.3. Используемые в блоке SilMU02 микромеханические акселерометр и гироскоп: а - акселерометр (верхняя крышка снята); б - акселерометр с заливкой компаундом; в - чувствительный элемент гироскопа

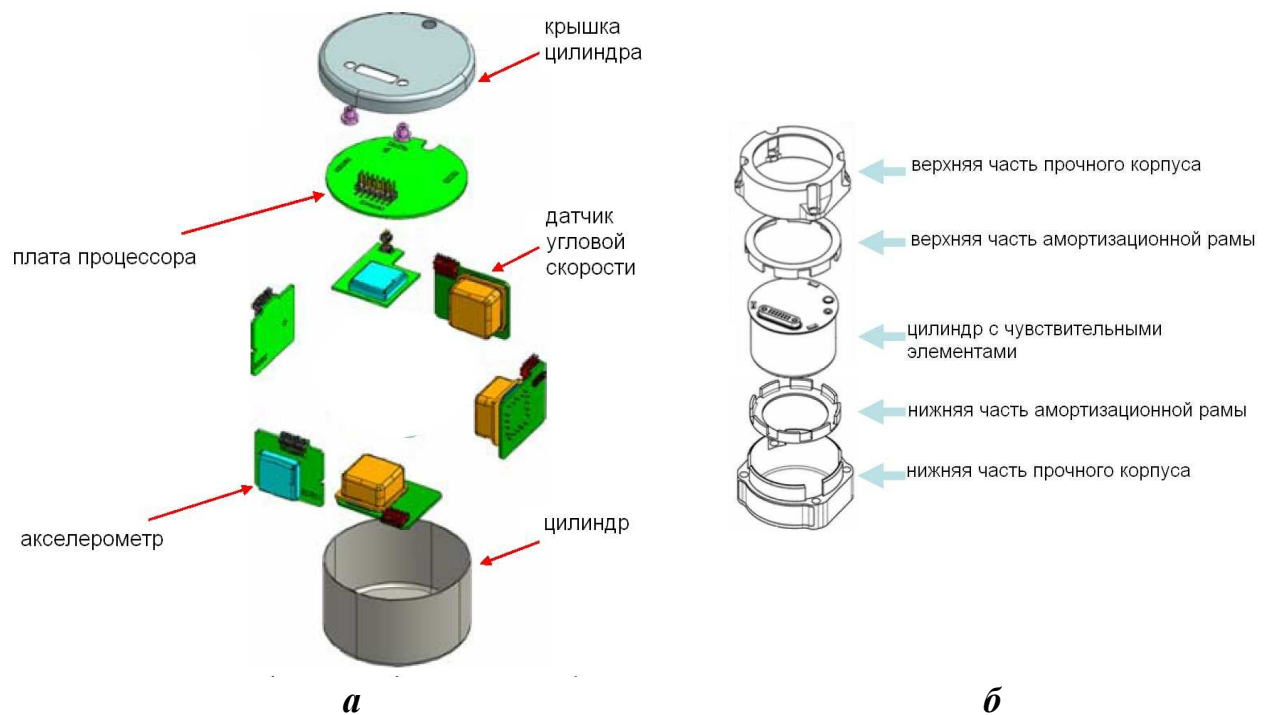


Рис. 4. Состав блока SilMU02: а - цилиндр с чувствительными элементами; б - конструктивные элементы блока

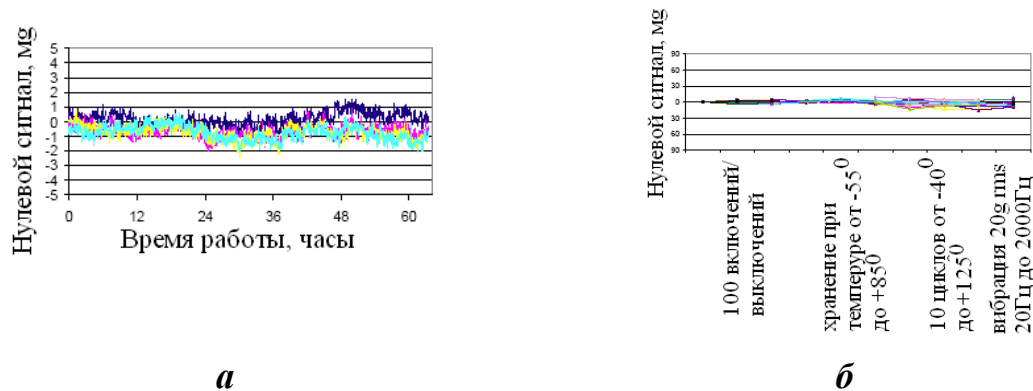


Рис. 5. Результаты измерения нулевого сигнала акселерометра HS8000 при различных внешних воздействиях

Так же важно характеристикой для элементов, эксплуатируемых на борту УАС, является воспроизводимость нулевого сигнала после ударного воздействия. Как правило, такая характеристика в рекламных материалах не указывается, и для её получения требуются испытания. Например, для акселерометра HS8000 максимальное изменение нулевого сигнала после воздействия удара амплитудой 40 000g составляет 14mg [8].

Особенности функционирования. Одной из особенностей функционирования НС на борту УАС являются значительные механические и

температурные воздействия [8]:

удары при выстреле представляют собой совокупность одного ударного импульса высокой амплитуды (20 000g, длительность >5мс) и нескольких импульсов высокой частоты и меньшей амплитуды (от 10 000g до 20 000g, длительностью <0,2мс);

широкополосная случайная вибрация в диапазоне частот от 20Гц до 2000Гц со среднеквадратичным значением 20g;

температура хранения от -55⁰С до +85⁰С;

рабочая температура от -40⁰С до +85⁰С.

Другой особенностью является хронология работы НС на борту УАС, отличная от хронологии других летательных аппаратов. В частности, на УАС Excalibur Block III предполагается начало работы БИЧЭ после выстрела, т.е. в полете [1]. В этом случае при разработке алгоритмического обеспечения необходимо иметь в виду, что процедура начальной выставки должна производиться в полете.

Траекторию полета после пуска (пассивный участок траектории) можно разделить на два участка: полет по баллистической траектории и управляемый полет. Первый занимает ≈100 секунд, например, для УАС ВTERM [6] ≈100...103 секунды, а для ERGM EX-171 ≈71 секунда. За это время происходит выход ПА на штатный режим работы (обнаружение сигналов спутников и вычисление координат движения), а также начало интегрированного (INS/GPS) режима работы. Если предусмотрено снижение частоты вращения и стабилизация угла крена, то она происходит примерно в середине первого участка, например, для УАС ERGM EX-171 на 44 секунде полета.

Заключение.

За рубежом ведутся активные научные и конструкторские работы по созданию инерциально-спутниковых навигационных систем для УАС. Один образец УАС, в состав которого входит INS/GPS система, принят на вооружение, еще, как минимум, 5 программ находится на этапе летных испытаний. Успешный опыт по созданию элементов INS/GPS системы имеют: американские фирмы Raytheon Missile Systems, ATK, Honeywell Aerospace и L3 Interstate Electronics Corporation, европейская фирма Atlantic Inertial Systems и израильская компания IMI.

Особенностью эксплуатации на борту УАС являются значительные ударные нагрузки (до 20 000g) и вибрации (20g rms). Так как УАС – это военное изделие, то предъявляются жесткие требования по температуре хранения и эксплуатации: для хранения от -55⁰С до +85⁰С, для работы от -40⁰С до +85⁰С. Это должно быть учтено при выборе элементной базы, при разработке конструкции и при составлении программ испытаний.

Класс точности применяемых в НС инерциальных чувствительных элементов: для ММГ 100⁰/ч, для ММА 10⁻³g (обе характеристики по вариации Алана).

При разработке алгоритмического обеспечения НС необходимо учитывать то, что блок чувствительных элементов располагается в носовой части УАС и то, что начальный участок полета происходит по баллистической траектории. Для перспективных образцов предполагается производить процедуру начальной выставки после выстрела в полете.

Список литературы

1. Боеприпасы точного наведения // Сборник научно-технической информации. Тула: Конструкторское бюро приборостроения, №1 (31), 2010. С. 70 – 120.
2. Гришин Ю. Пути совершенствования артиллерийского вооружения основных боевых кораблей ВМС США // Зарубежное военное обозрение. М: «Издательский дом «Красная звезда», №6 (771), 2011. С. 78 – 83.
3. Русинов В. Артиллерийские боеприпасы повышенной точности: история, состояние, развитие (часть 1) // Зарубежное военное обозрение. М: «Издательский дом «Красная звезда», №6 (783), 2012. С. 48 – 53.
4. Русинов В. Артиллерийские боеприпасы повышенной точности: история, состояние, развитие (часть 2) // Зарубежное военное обозрение. М: «Издательский дом «Красная звезда», №7 (784), 2012. С. 44 – 50.
5. URL: <http://www.shipbucket.com/forums/viewtopic.php?p=24408> (Дата обращения 7.10.2013).
6. Dan Coskren, Tim Easterly, Robert Polutchko. Low-Cost GPS/INS Guidance for Navy Munitions Launches. URL: http://www.teknol.ru/trash/guided_munition_2112523357.pdf (Дата обращения 04.10.2013).
7. URL: <http://www.baesystems-gyro.com> (Дата обращения 17.12.2005).
8. Habibi S. Gun Hard Inertial Measurement Unit based on MEMS capacitive accelerometer and rate sensor. URL: <http://www.colibrys.com>. (Дата обращения 10.11.2010).

Богданов Максим Борисович, канд. техн. наук, доц., Россия, Тула, Тульский государственный университет

FEATURES OF CONSTRUCTION OF NAVIGATION SYSTEMS FOREIGN GUIDED MUNITIONS

M.B. Bogdanov

In this paper the examples of foreign programs to create guided munitions analyzed the characteristics of building their navigation systems.

Key words: guided munitions, navigation system.

Bogdanov Maksim Borisovich, candidate of technical science, docent, Russia, Tula, Tula State University

СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ И НАВЕДЕНИЯ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ С УВЕЛИЧЕННЫМИ УГЛАМИ ОБЗОРА

В.А. Смирнов, В.С. Захариков

Рассмотрена возможность построения системы стабилизации и наведения (ССиН) линии визирования с расширенным диапазоном углов горизонтального и вертикального наведения. Приведены результаты численного моделирования работы ССиН.

Ключевые слова: система стабилизации; погрешности наведения; углы наведения.

В настоящее время при поиске и сопровождении различных целей с борта подвижных объектов широкое применение получили системы стабилизации и наведения линии визирования (ССиН ЛВ). В современных условиях высокая маневренность носителя и отслеживаемых целей требуют увеличения углов наведения ССиН ЛВ [8].

Обзор работ [1], посвященных ССиН, показал, что практически все существующие в настоящее время ССиН ЛВ построены на основе двухосного карданова подвеса. Недостатком такого исполнения является то, что при угле вертикального наведения близком к 90 градусам проявляется эффект «складывания рамок», и, как следствие, не обеспечивается стабилизация и слежение за целью [2-6].

Ввиду отмеченного недостатка, в работе [7] предложена кинематическая схема ССиН ЛВ (рис.1), обеспечивающая углы наведения по высоте $\pm 123^\circ$, по азимуту $\pm 180^\circ$.

Из кинематических уравнений связей следует, что в случае, когда линия визирования ССиН направлена точно на цель, угловые скорости движения рам карданова подвеса связаны с угловыми скоростями движения основания и угловыми скоростями движения цели уравнениями (1):

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_y = \frac{\omega_{y3\text{опт}} - 2\dot{\varphi}_3 + (\omega_{x0} \cos \varphi_y - \omega_{z0} \sin \varphi_y) \sin \varphi_z}{\cos \varphi_z} - \omega_{y0}; \\ \dot{\varphi}_z = \frac{\omega_{z3\text{опт}} - \dot{\varphi}_y \sin 2\varphi_3 \sin \varphi_z}{\cos 2\varphi_3} - \omega_{x0}(\text{tg } 2\varphi_3 \cos \varphi_y \cos \varphi_z + \\ + \sin \varphi_y) - \omega_{y0} \text{tg } 2\varphi_3 \sin \varphi_z - \omega_{z0}(\cos \varphi_y - \text{tg } 2\varphi_3 \sin \varphi_y \cos \varphi_z). \end{cases} \quad (1)$$

где φ_z – угол поворота внутренней рамки относительно наружной;
 φ_3 (рад) – угол поворота зеркала относительно внутренней рамки;
 φ_y (рад) – угол поворота наружной рамки; проекции векторов угловой скорости на связанные с ними оси обозначены, соответственно,

ω_{xi} , ω_{yi} , ω_{zi} (рад/с) (при этом $i=0$ - для основания; $i=1$ - для наружной рамки; $i=2$ - для внутренней рамки; $i=3$ - для зеркала); $\omega_{лу}$, $\omega_{лз}$ (рад/с) - проекции угловой скорости цели на оси системы координат, связанной с направлением на цель; $\dot{\phi}_3$, $\dot{\phi}_y$, $\dot{\phi}_z$ (рад/с) - относительные угловые скорости подвижного зеркала, внутренней рамки и наружной рамки, соответственно.

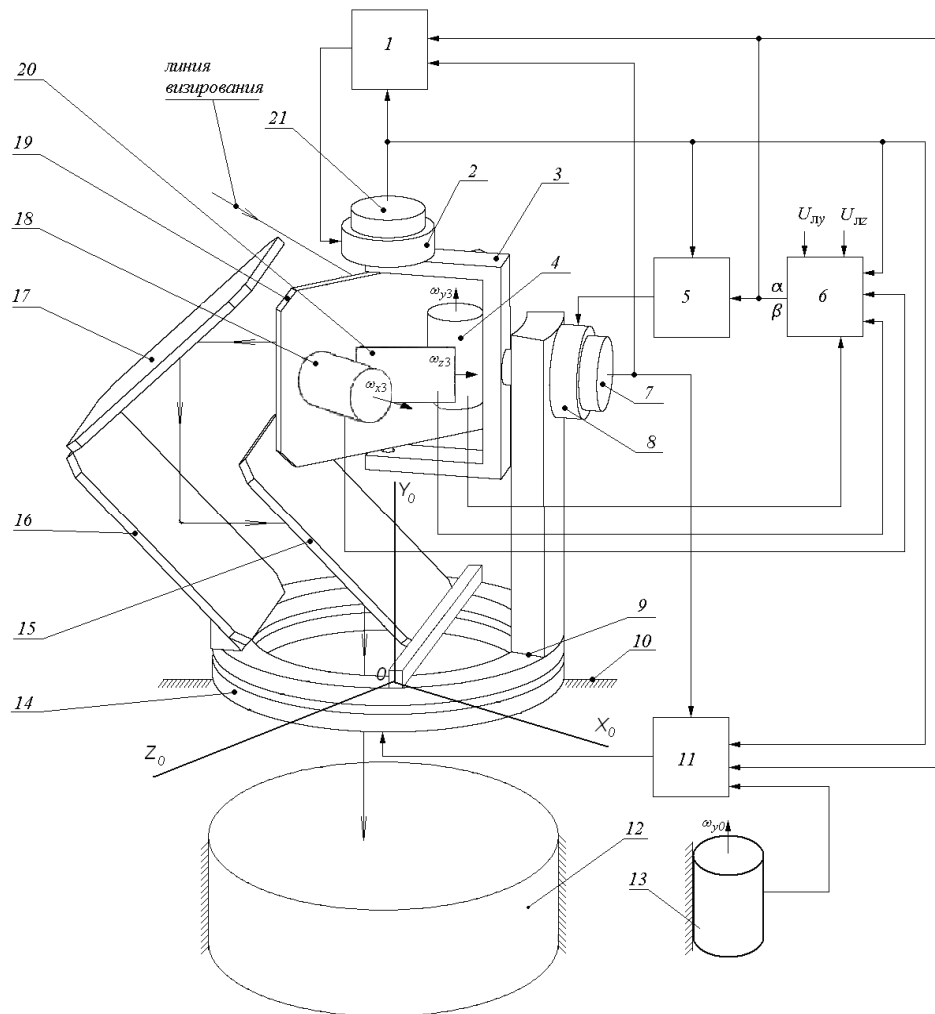


Рис.1. Принципиальная кинематическая схема ССиН: 1, 5, 11 – блоки управления исполнительными двигателями; 2, 8, 14 - исполнительные двигатели; 3 - внутренняя рамка; 4, 13, 18, 20 - датчики угловой скорости (ДУС); 6 - блок вычисления погрешностей стабилизации линии визирования: α – погрешность по азимуту; β – погрешность по углу места; 7, 21 - датчики угла; 9 – наружная рамка; 10 – основание; 12 – фотоприемное устройство с объективом; 15, 16, 17 – зеркала, жестко связанные с наружной рамкой; 19 – подвижное зеркало; $OX_0Y_0Z_0$ - система координат, связанная с подвижным основанием

Из первого уравнения системы (1) следует, что для того, чтобы при $\varphi_z \rightarrow 90^\circ$ угловая скорость $\dot{\varphi}_y$ не стремилась к бесконечности, необходимо выполнение условия:

$$2\dot{\varphi}_3 = \omega_{y3\text{опт}} + (\omega_{x0} \cos \varphi_y - \omega_{z0} \sin \varphi_y) \sin \varphi_z. \quad (2)$$

Таким образом, движение ЛВ по двум осям при больших углах вертикального наведения обеспечивается дополнительной осью вращения.

При постоянном выполнении условия (2) угол φ_3 может неограниченно возрастать (например, при наличии постоянной угловой скорости наведения по азимуту $\omega_{y3\text{опт}}$). Из второго уравнения системы (1) видно, что угол поворота φ_3 подвижного зеркала 19 ограничен и не должен выходить за пределы $\pm (40...42)^\circ$. Кроме того, угол φ_3 ограничен конструкцией ССиН. Поэтому управление необходимо строить таким образом, чтобы условие (2) выполнялось только при $\varphi_z \rightarrow 90^\circ$, т.е. при угле, при котором оси вращения наружной рамки и зеркала совпадают.

При $\varphi_z \rightarrow 0$ угол φ_3 должен стремиться к нулю (в принятой системе координат). С учетом данных требований изменим условие (2) и потребуем выполнения следующего кинематического соотношения:

$$\dot{\varphi}_3 = \frac{[\omega_{y3\text{опт}} + (\omega_{x0} \cos \varphi_y - \omega_{z0} \sin \varphi_y) \sin \varphi_z] \sin^2 \varphi_z - k\varphi_3 \cos^2 \varphi_z}{2}, \quad (3)$$

где $k > 0$ - коэффициент, задающий отношение между максимальным углом φ_3 и максимальной угловой скоростью $\dot{\varphi}_y$.

Коэффициент $k\varphi_3 \cos^2 \varphi_z$ определяет «жесткость» электрической пружины на оси вращения зеркала 19, которая образуется двигателем 2, коэффициентом обратной связи $k\varphi_3 \cos^2 \varphi_z$ и ДУ 21 (рис.1).

Для того, чтобы движение ССиН ЛВ соответствовало кинематическим уравнениям связей (1) и (3), необходимо сформировать соответствующие управляющие воздействия для исполнительных двигателей ССиН ЛВ (4).

$$\begin{cases} U_3 = -K_3 \left(\int \dot{\alpha} dt \right) \sin^2 \varphi_z - K'_y \omega_{ly} \sin^2 \varphi_z + k' \varphi_3 \cos^2 \varphi_z, \\ U_y = -K_y \left(\int \dot{\alpha} dt \right) \cos \varphi_z - K'_y [\omega_{ly} - \omega_{y0}] - K_{22} \varphi_3 \cos \varphi_z, \\ U_z = -K_z \frac{\beta}{\cos 2\varphi_3} - K'_z \omega_{lz} - \frac{U_y \sin 2\varphi_3 \sin \varphi_z}{\cos 2\varphi_3}, \end{cases} \quad (4)$$

где α и β являются погрешностями наведения ССиН по каналам азимута и угла места, соответственно; U_3, U_y, U_z (В) – задающие воздействия для

соответствующих двигателей; K_z , K_y , K_x ($B \cdot c / рад$) – коэффициенты передачи контуров обратной связи соответствующих двигателей по сигналу ошибки стабилизации; k' ($B / рад$) – коэффициент, задающий отношение между максимальным углом φ_z и максимальной угловой скоростью $\dot{\varphi}_y$; K'_y , K'_z – коэффициенты передачи по внешним сигналам управления, пропорциональным соответствующим угловым скоростям наведения.

В соответствии с описанным в работе [2] принципом работы ССиН и представленными выше уравнениями построена функциональная схема ССиН (рис.2).

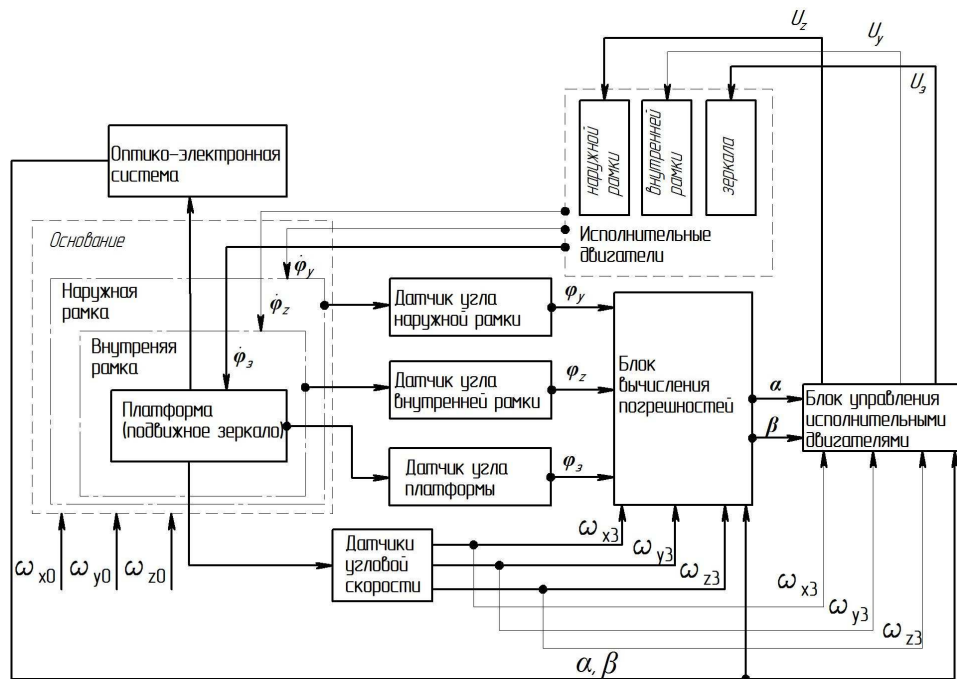


Рис.2. Функциональная схема ССиН ЛВ

Для оценки погрешностей стабилизации и наведения проведено численное моделирование работы системы при трехкомпонентной качке основания и наличии угловых скоростей движения цели. При моделировании учитывались характеристики используемых чувствительных элементов – датчиков угловой скорости (ДУС), поскольку они определяют минимально достижимые погрешности стабилизации и наведения. Поскольку при построении малогабаритной ССиН ЛВ важными параметрами являются масса и габариты самого ДУС для моделирования работы ССиН выбраны математические модели волоконно-оптического (ВОГ, ВГ941AS фирмы «Физоптика», масса 25 г, габариты 24x50 мм) и микромеханического гироскопов (ММГ, ADXRS620 фирмы Analog Devices, масса меньше 0,5 г).

Моделирование проведено при параметрах качки основания, приведенных в табл.1 [8] в программе Matlab. Результаты моделирования приведены в табл.2. Полученные значения погрешностей стабилизации и наведе-

дения являются амплитудными и получены без учета дополнительных возмущений, влияющих на измерение угловых скоростей.

Таблица 1

**Параметры качки основания ССН ЛВ,
установленной на борту БПЛА**

Параметр	Ось системы координат		
	X_0	Y_0	Z_0
Амплитуда угловой скорости качки основания, ω_{i0}^a , рад/с	1	0,9	0,5
Частота качки основания ν_{i0} , Гц	1	0,5	1,5

Таблица 2

Погрешности ССН ЛВ, установленной на борту БПЛА

Режим	Погрешности стабилизации, угл.сек					
	идеальный ДУС		ВОГ		ММГ	
	α	β	α	β	α	β
Стабилизации	4,8	3	14,5	11	17	40
Наведения при постоянной скорости слежения за целью	5,2	4,2	16	70	16	78
Наведение при переменной скорости слежения за целью	5	4	13	22	14	50

Результаты моделирования показали, что предложенная кинематическая схема и способы управления ее рамками, позволяют обеспечить малые погрешности стабилизации и наведения при значительных амплитудах качки основания. Влияние ДУС на погрешность системы стабилизации заметно, но даже в этом случае для выбранных датчиков обеспечиваются достаточно малые погрешности.

Список литературы

1. Захариков В.С. Системы стабилизации и наведения линии визирования, выпускаемые отечественной и зарубежной промышленностью / В.С. Захариков, В.А. Смирнов // Известия ТулГУ. Технические науки, Тула, 2011. С.80-86.
2. Автоматическая стабилизация оптического изображения / Д. Н.

Еськов, Ю. П., Ларионов, В. А. Новиков [и др.]. Л.: Машиностроение, 1988. 240 с.

3. Бабаев А. А. Стабилизация оптических приборов / А.А. Бабаев - Л.: Машиностроение, 1975. 190 с.

4. Боднер В.А. Стабилизация летательных аппаратов и автопилоты / В.А. Боднер, М.С. Козлов. М.: Оборонгиз, 1961, 508 с.

5. Пельпор Д.С. Гироскопические системы. Ч.1. / Д.С. Пельпор. М.: Высшая школа, 1971. 567 с.

6. Рахтеенко Е.Р. Гироскопические системы ориентации / Е.Р. Рахтеенко. М.: Машиностроение, 1989. 227 с.

7. Захариков В.С. Система стабилизации и наведения линии визирования с увеличенными углами обзора / В.А. Смирнов, В.С. Захариков, В.В. Савельев // Гироскопия и навигация, № 4. Санкт-Петербург, 2011. С.4-11.

8. Лебедев А.А. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов / А.А. Лебедев, Л.С. Чернобровкин. М.: Машиностроение, 1973. 615 с.

9. Бабаев А. А. Стабилизация оптических приборов / А.А. Бабаев. Л.: Машиностроение, 1975. 190 с.

Владимир Александрович Смирнов, канд. техн. наук, доц., Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Вячеслав Сергеевич Захариков, аспирант, Россия, Тула, Тульский государственный университет

SYSTEM OF STABILIZATION AND GUIDANCE A LINE OF SIGHT WHICH EXTENDED FIELD OF VIEW

V.A. Smirnov, V.S. Zacharikov

System stabilization and guidance providing extended range of horizon and vertical angles guidance was considered in this article. Errors of system stabilization and guidance of line of sight installing on board unmanned aerial vehicles was considered as a result modeling work system.

Key words: stabilization system, guidance errors, targeting angles.

Smirnov Vladimir Aleksandrovich, candidate of technical science, docent, Russia, Tula, sva37@tula.net, Tula State University,

Zacharicov Vyacheslav Zacharovich, postgraduate, zaharikovvs@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ ПО СИГНАЛАМ ОДНОЙ АНТЕННЫ СНС

А.В. Прохорцов

Предлагается способ определения параметров угловой ориентации, при котором достаточно информации поступающей с одной антенны аппаратуры спутниковой навигационной системы (СНС) и информации с БИНС. Это позволяет существенно уменьшить габариты инерциально-спутниковой навигационной системы.

Ключевые слова: параметры ориентации, вектор скорости, бесплатформенная инерциальная навигационная система, спутниковая навигационная система.

Рассматривается инерциально-спутниковая система навигации (ИССН) высокоманевренного летательного аппарата (ВЛА) с малым временем полета. Под ИССН понимается информационно-измерительная система, устанавливаемая на борту ВЛА и предназначенная для выработки параметров движения (ускорений и скоростей), координат и параметров ориентации ВЛА во время полета. ИССН содержит две независимые подсистемы – это БИНС и приемная аппаратура СНС ГЛОНАСС и/или GPS. Совместная обработка показаний данных подсистем в бортовой цифровой вычислительной машине обеспечивает уменьшение погрешностей каждой из подсистем, что и позволяет построить точную и, одновременно, относительно недорогую ИССН.

Особенностью традиционно применяемых ИССН является то, что в них используется позиционно-скоростная коррекция от СНС. Однако, как показали исследования авторов работы [6], (а также исследования ряда ведущих организаций России (ЦНИИ «Электроприбор») и США (лаборатория Ч. Драйпера), наиболее эффективным является коррекция показаний БИНС по параметрам ориентации, определяемым по сигналам СНС [1], [2], [3]. Существующие методы определения параметров ориентации по сигналам СНС, обладают определенными недостатками, и для своей реализации требуют наличия трех разнесенных антенн [4, 5].

Однако, на ВЛА практически невозможно разместить несколько разнесенных антенн из-за малых размеров ВЛА и его высокой динамики.

Предлагается способ определения параметров угловой ориентации, при котором достаточно информации поступающей с одной антенны аппаратуры СНС и информации с БИНС. Это позволяет существенно уменьшить габариты инерциально-спутниковой навигационной системы.

Сущность предлагаемого способа заключается в следующем:

По сигналам СНС определяется вектор скорости v_g^{CHC} , проекции которого в базовой системе координат (СК) определены:

$$V_g^{CHC} = \begin{pmatrix} V_{Xg}^{CHC} \\ V_{Yg}^{CHC} \\ V_{Zg}^{CHC} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

По показаниям БИНС также определяется вектор скорости $V_g^{БИНС}$, проекции которого в базовой системе координат определены:

$$V_g^{БИНС} = \begin{pmatrix} V_{Xg}^{БИНС} \\ V_{Yg}^{БИНС} \\ V_{Zg}^{БИНС} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Сравниваем между собой вектора V_g^{CHC} и $V_g^{БИНС}$. Расхождение по длине между этими векторами как показано в [6], определяется в основном погрешностями акселерометров, а расхождение по направлению определяется погрешностями определения параметров ориентации БИНС, которые в свою очередь в основном зависят от погрешностей ДУСов.

Найдем угол η между векторами V_g^{CHC} и $V_g^{БИНС}$:

$$\cos(\eta) = \frac{V_{Xg}^{CHC} * V_{Xg}^{БИНС} + V_{Yg}^{CHC} * V_{Yg}^{БИНС} + V_{Zg}^{CHC} * V_{Zg}^{БИНС}}{\sqrt{V_{Xg}^{CHC^2} + V_{Yg}^{CHC^2} + V_{Zg}^{CHC^2}} * \sqrt{V_{Xg}^{БИНС^2} + V_{Yg}^{БИНС^2} + V_{Zg}^{БИНС^2}}}. \quad (3)$$

Если угол η больше какого-то определенного значения, например 1° , то применяем метод, описанный ниже, если меньше, то считаем показания БИНС правильными.

Найдем угол между вектором $V_g^{БИНС}$ и осями связанной с объектом СК (OXYZ)

Положение СК OXYZ относительно базовой СК определяется матрицей направляющих косинусов:

	X	Y	Z
OX_g			
OY_g	11	12	13
OZ_g	21	22	23
	31	32	33

где $c_{11} = \cos \Psi \cos \vartheta$; $c_{21} = \sin \vartheta$; $c_{31} = -\sin \Psi \cos \vartheta$;

$$\begin{aligned}
 c_{12} &= \sin \gamma \sin \Psi - \cos \gamma \cos \Psi \sin \vartheta; \\
 c_{22} &= \cos \vartheta \cos \gamma; \\
 c_{32} &= \sin \gamma \cos \Psi + \cos \gamma \sin \Psi \sin \vartheta; \\
 c_{31} &= \cos \gamma \sin \psi + \sin \gamma \cos \psi \sin \vartheta; \\
 c_{32} &= -\cos \vartheta \sin \gamma; \\
 c_{33} &= \cos \gamma \cos \psi - \sin \gamma \sin \psi \sin \vartheta,
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где ψ, ϑ, γ - углы курса, тангажа и крена, определенные БИНС.

Угол α_1 между $V_g^{БИНС}$ и OX определяется по формуле:

$$\cos(\alpha_1) = \frac{c_{11} * V_{Xg}^{БИНС} + c_{21} * V_{Yg}^{БИНС} + c_{31} * V_{Zg}^{БИНС}}{\sqrt{c_{11}^2 + c_{21}^2 + c_{31}^2} * \sqrt{V_{Xg}^{БИНС^2} + V_{Yg}^{БИНС^2} + V_{Zg}^{БИНС^2}}}. \tag{5}$$

Угол α_2 между $V_g^{БИНС}$ и OY определяется по формуле:

$$\cos(\alpha_2) = \frac{c_{12} * V_{Xg}^{БИНС} + c_{22} * V_{Yg}^{БИНС} + c_{32} * V_{Zg}^{БИНС}}{\sqrt{c_{12}^2 + c_{22}^2 + c_{32}^2} * \sqrt{V_{Xg}^{БИНС^2} + V_{Yg}^{БИНС^2} + V_{Zg}^{БИНС^2}}}. \tag{6}$$

Угол α_3 между $V_g^{БИНС}$ и OZ определяется по формуле:

$$\cos(\alpha_3) = \frac{c_{13} * V_{Xg}^{БИНС} + c_{23} * V_{Yg}^{БИНС} + c_{33} * V_{Zg}^{БИНС}}{\sqrt{c_{13}^2 + c_{23}^2 + c_{33}^2} * \sqrt{V_{Xg}^{БИНС^2} + V_{Yg}^{БИНС^2} + V_{Zg}^{БИНС^2}}}. \tag{7}$$

Формулы 5-7 определяют положение связанной системы координат относительно вектора скорости $V_g^{БИНС}$ определенного по показаниям БИНС.

Далее мы считаем, что правильным является вектор скорости V_g^{CHC} , определенный по СНС. И поэтому «доворачиваем» связанную систему координат таким образом, чтобы вектор $V_g^{БИНС}$ совпал с вектором V_g^{CHC} , при этом углы между вектором V_g^{CHC} и осями связанной СК должны совпадать с углами, которые были между вектором $V_g^{БИНС}$ и осями связанной СК определенными по формулам 5-7.

Углы между вектором V_g^{CHC} и осями скорректированной связанной СК определяются по формулам:

Угол β_1 между V_g^{CHC} и OX определяется по формуле:

$$\cos(\beta_1) = \frac{c_{11}^* * V_{Xg}^{CHC} + c_{21}^* * V_{Yg}^{CHC} + c_{31}^* * V_{Zg}^{CHC}}{\sqrt{c_{11}^{*2} + c_{21}^{*2} + c_{31}^{*2}} * \sqrt{V_{Xg}^{CHC^2} + V_{Yg}^{CHC^2} + V_{Zg}^{CHC^2}}}. \quad (5^*)$$

Угол β_2 между V_g^{CHC} и OY определяется по формуле:

$$\cos(\beta_2) = \frac{c_{12}^* * V_{Xg}^{CHC} + c_{22}^* * V_{Yg}^{CHC} + c_{32}^* * V_{Zg}^{CHC}}{\sqrt{c_{12}^{*2} + c_{22}^{*2} + c_{32}^{*2}} * \sqrt{V_{Xg}^{CHC^2} + V_{Yg}^{CHC^2} + V_{Zg}^{CHC^2}}}. \quad (6^*)$$

Угол β_3 между V_g^{CHC} и OZ определяется по формуле:

$$\cos(\beta_3) = \frac{c_{13}^* * V_{Xg}^{CHC} + c_{23}^* * V_{Yg}^{CHC} + c_{33}^* * V_{Zg}^{CHC}}{\sqrt{c_{13}^{*2} + c_{23}^{*2} + c_{33}^{*2}} * \sqrt{V_{Xg}^{CHC^2} + V_{Yg}^{CHC^2} + V_{Zg}^{CHC^2}}}. \quad (7^*)$$

где

$$\begin{aligned} c_{11}^* &= \cos \Psi^* \cos \vartheta^*; \\ c_{21}^* &= \sin \vartheta^*; \\ c_{31}^* &= -\sin \Psi^* \cos \vartheta^*; \\ c_{21}^* &= \sin \gamma^* \sin \Psi^* - \cos \gamma^* \cos \Psi^* \sin \vartheta^*; \\ c_{22}^* &= \cos \vartheta^* \cos \gamma^*; \\ c_{32}^* &= \sin \gamma^* \cos \Psi^* + \cos \gamma^* \sin \Psi^* \sin \vartheta^*; \\ c_{31}^* &= \cos \gamma^* \sin \psi^* + \sin \gamma^* \cos \psi^* \sin \vartheta^*; \\ c_{32}^* &= -\cos \vartheta^* \sin \gamma^*; \\ c_{33}^* &= \cos \gamma^* \cos \psi^* - \sin \gamma^* \sin \psi^* \sin \vartheta^*; \end{aligned} \quad (4^*)$$

где $\psi^*, \vartheta^*, \gamma^*$ - Скорректированные углы курса.

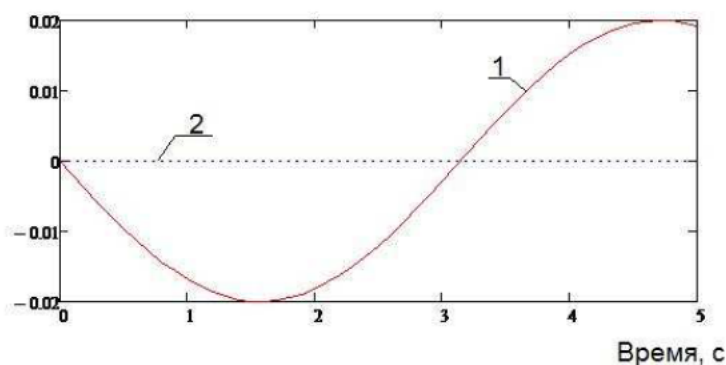
Приравняв правые части выражений (5) и (5*), (6) и (6*), (7) и (7*) с учетом (4) и (4*).

Добавим полученные формулы, условие масштаба и перпендикулярности, решим полученную систему методом наименьших квадратов и найдем $\psi^*, \vartheta^*, \gamma^*$. При решении методом наименьших квадратов за начальные значения $\psi^*, \vartheta^*, \gamma^*$ примем ψ, ϑ, γ .

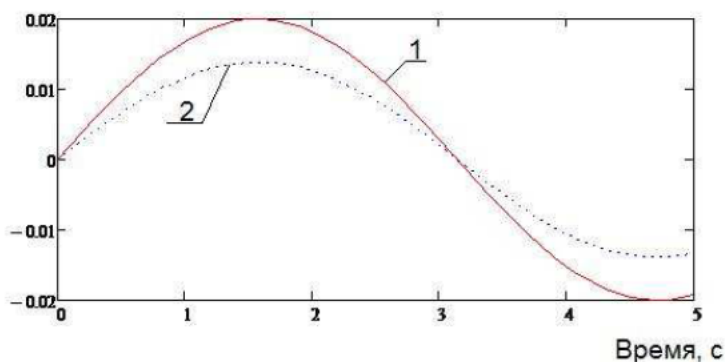
Для оценки работоспособности предложенного метода проведено моделирование в среде Mat работы ИССН для условий, характерных для ВЛА.

Результаты моделирования показаны на рис. 1.

погрешность определения
угла курса, рад



погрешность определения
угла тангажа, рад



погрешность определения
угла крена, рад

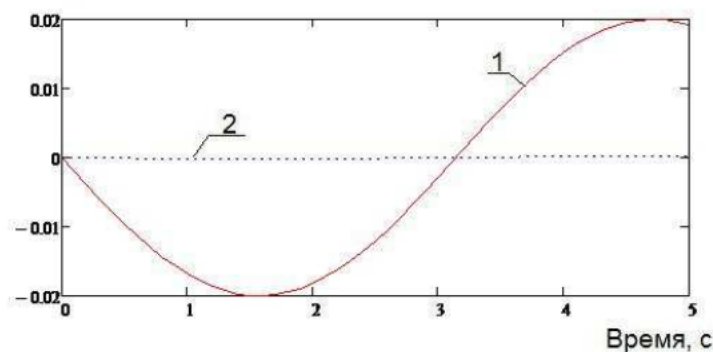


Рис. 1. Погрешность определения углов курса, тангажа, крена без использования (1) и с использованием (2) предлагаемого способа

Проведенное моделирование показало работоспособность и эффективность предложенного способа коррекции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-08-00694-а).

Список литературы

1. Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В. Об эффективности различных типов коррекции показаний БИНС по сигналам СНС. Сборник

материалов XIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 2006. С.142-144.

2. Пешехонов В.Г. Проблемы и перспективы современной гироскопии// Изв.вузов. Приборостроение. 2000. Т.43. №1-2. С. 48-55.

3. Цикл лекций 232 по теме «Достижения в области навигационных датчиков и методов комплексирования» (SET-064), 2004.

4. Прохорцов А.В. Способы определения угловой ориентации объекта по информации от спутниковых навигационных систем. Региональная научно-техническая конференция Техника XXI века глазами молодых ученых. Тула: ТулГУ, 2003. С. 209-216.

5. Прохорцов А.В. Принципы построения спутниковых навигационных систем. Учебное пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 99с.

6. Богданов М.Б., Прохорцов А.В. Савельев В.В., Мясоедов Д.С. Погрешности интегрированной инерциально-спутниковой системы ориентации и навигации подвижного объекта. Оборонная техника. 2005. №6-7. С. 90-95.

Прохорцов Алексей Вячеславович, канд. техн. наук, доц., proxav@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

CORRECTION OF THE POSSIBILITY OF SINS IN TESTIMONY ORIENTATION PARAMETERS ON SIGNALS OF ONE ANTENNA SNA

AV Prohortsev

Provided a method for compensating readings of strapdown inertial navigation system (SINS) Specify the orientation in which it suffices to information received from one antenna of satellite navigation system (SNS) and the information from the SINS . This can significantly reduce the size of INS-GPS navigation system. Experimental studies have shown the effectiveness and efficiency of the proposed method of correction.

Key words: orientation parameters , velocity vector, besplatfor mennaya - inertial navigation system , satellite navigation system

Prohortsev Alexei Vjacheslavovich, candidate of technical sciences, docent, proxav@rambler.ru, Russia , Tula, Tula State University

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕГИСТРАЦИИ ВЫЗВАННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ В РАЗРАБОТКЕ НЕЙРОИНТЕРФЕЙСА

А.В. Томашвили

В статье идет речь о применении технологии регистрации вызванных потенциалов в разработке нейроинтерфейса. Рассмотрен способ и устройство для регистрации вызванных потенциалов, основанные на использовании самонастраивающегося фильтра, который выделяет из ЭЭГ доминирующий ритм. Обобщен новый материал по исследуемой теме.

Ключевые слова: нейроинтерфейс, биотехническая система, электроэнцефалограмма, вызванный потенциал, самонастраивающийся фильтр, доминирующий ритм.

Наилучшим способом исследования деятельности мозга является электроэнцефалография (ЭЭГ). Биоэлектрическая активность мозга регистрируется с поверхности головы человека или непосредственно коры головного мозга. Фиксируемые сигналы обладают всеми признаками случайного процесса, и, тем не менее, несут в себе информацию о работе множества функциональных систем организма, которые имеют локализацию своих управляющих звеньев в коре головного мозга. Подобные сигналы могут использоваться в процессе управления техническими объектами (например, протез руки и т.п.).

Биотехническая система, в которой управление техническим объектом осуществляется в соответствии с сигналом, снимаемым непосредственно с головного мозга, называется нейроинтерфейс или «интерфейс мозг - компьютер» (ИМК, англ. BCI). Технологии ИМК предназначены для передачи мысленных команд напрямую от мозга к внешним приемным или исполнительным устройствам без посредства мышц. Такие системы необходимы для улучшения жизни людей с тяжелыми двигательными и речевыми поражениями, для разработки потенциальных приложений в области нейрореабилитации, мультимедийных коммуникаций, виртуальной реальности и развлечений, в военном деле.

Решающая роль в построении интерфейса «мозг-компьютер» принадлежит способу, которым выделяется ответ мозга на внешний раздражитель. Ввиду индивидуальности таких откликов возникает необходимость предварительной настройки (около двух минут). Такое сравнительно большое время настройки (хотя оно признано минимальным) необходимо для накопления и осреднения, выделения характерных признаков ответа. При этом фактически исследователь опирается на основную гипотезу метода вызванных потенциалов (ВП) об идентичности ответов на стимул.

Рассматривается новая методика ВП головного мозга: метод реги-

страции и отображения ВП. Методика ВП мозга традиционно проводится способом выделения, усреднения слабых потенциалов биоэлектрической активности мозга при подаче афферентных стимулов во время регистрации ЭЭГ. Виды подаваемых стимулов могут быть как экзогенные – зрительные, слуховые, чувствительные, так и эндогенные – когнитивные. Большим преимуществом методики ВП является ее неинвазивность, единый алгоритм трактовки, информативность.

Сложность регистрации ВП заключается в том, что ответы мозга значительно ниже активности спонтанной ритмики ЭЭГ и других сигналов, но имеют с ними общий спектр. Основным методом, который используется в настоящее время для выделения ВП, является метод синхронного накопления и усреднения [1]. Сущность метода заключается в многократной подаче стимулов и суммации каждого последующего ответа с предыдущими. Вместо методики синхронного накопления часто применяют метод когерентного усреднения, когда ответы не только суммируют, но и делят на число суммаций. После нескольких десятков усреднений соотношение ВП к шуму спонтанной ритмики ЭЭГ достаточно, чтобы достоверно выделить сигнал ВП. К шумам относят все процессы, не связанные со стимулом, которыми могут являться как ритмы спонтанной ЭЭГ, так и различные артефакты (аппаратные и физиологические).

С помощью метода синхронного накопления и когерентного усреднения могут быть выделены различные ответы мозга, связанные со стимулом или с какими-то повторяющимися событиями. В зависимости от вида подаваемого стимула выделяют несколько видов ВП: зрительные, соматосенсорные, слуховые, когнитивные, моторные, тактильные.

Известный способ [2] позволяет получить единичные реализации когнитивных ВП. Альтернативным методом исследования центральной нервной системы (ЦНС) являются психофизиологические исследования, при которых фиксируется время моторной реакции как завершающей стадии психического акта. Методология таких исследований существенно расходится с электрофизиологическими, даже в случае обращения к одной и той же функциональной системе (например, при регистрации когнитивных ВП Р300 испытуемый должен нажимать кнопку, как и при определении сенсомоторной реакции на звуковой стимул).

Среднелатентные зрительные вызванные потенциалы (ЗВП) на вспышку регистрируются на специализированных компьютерных системах (например, «Электроретинограф» фирмы МБН, г. Москва) методом синхронного накопления, когда отрезки ЭЭГ суммируются, начиная с момента подачи вспышки фотостимулятором. Результат получается после 50 – 100 вспышек, поскольку в суммируемых отрезках ЭЭГ присутствует в случайной фазе, и после многократного суммирования стремится к своему математическому ожиданию, т. е. к нулю. При этом ЗВП, имеющие более регулярный характер, накапливаются и становятся заметными, несмотря на

свою малую амплитуду (единицы мкВ). Длиннолатентные ВП, чаще именуемые когнитивными (КВП) или P_{300} (по латентности главного положительного пика, возникающего около 300 мс после афферентного стимула), регистрируются, как правило, на других компьютерных системах, имеющих в своем составе аудиостимулятор, а также кнопку для связи с компьютером. Это обусловлено самой методикой выделения P_{300} : испытуемый должен опознать среди однотонных звуковых стимулов случайным образом возникающие стимулы другого тона, и отреагировать на них нажатием кнопки. В синхронном накоплении участвуют только те отрезки ЭЭГ (25 – 50 реализаций), которые следуют за значимым стимулом. В то же время в литературе указывается на возможность регистрировать P_{300} на любые другие стимулы [1].

Известны способ и устройство для регистрации КВП [2], основанные на использовании самонастраивающегося фильтра, который выделяет из ЭЭГ доминирующий ритм. При вычитании его из исходного сигнала можно выделить когнитивную составляющую и определить P_{300} . Такая система не может зарегистрировать ЗВП, поскольку время переходного процесса у нее составляет 0,15 – 0,2 с, и главные компоненты ЗВП – пики N_{75} и P_{100} будут потеряны из-за недоподавления доминирующего ритма.

Известное устройство [2] работает по принципу самонастройки, опорным сигналом служит доминирующий ритм, например, альфа-ритм ЭЭГ. В проводимых нами экспериментах испытуемому предъявляются вербальные и символьные стимулы на экране компьютера. При этом альфа-ритм угнетается, иногда до полного исчезновения. Для выделения из ЭЭГ единичных реализаций ВП предприняты следующие меры:

- в устройство введен блок предварительной настройки;
- используется фильтр низких частот (ФНЧ) вместо полосового.

Представленная система изображена на рис. 1.

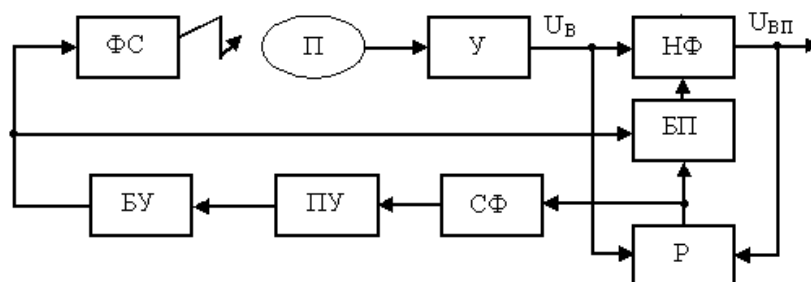


Рис. 1. Система диагностики вызванных потенциалов:
ФС – фотостимулятор; **П** – пациент; **У** – усилитель ЭЭГ;
НФ – низкочастотный фильтр; **БУ** – блок управления;
БП – блок переключения; **ПУ** – пороговое устройство;
СФ – сглаживающий фильтр; **Р** – регулятор

В отличие от полосового фильтра, у фазовой частотной характеристики ФНЧ нет точки перехода через ноль. Поэтому невозможно использовать фазовые детекторы, как в известном устройстве [2]. На рис 2. показана структура цепи, регулирующей частоту среза ФНЧ, в которой коэффициент подавления доминирующего ритма поддерживается на постоянном уровне независимо от индивидуальных особенностей испытуемого.

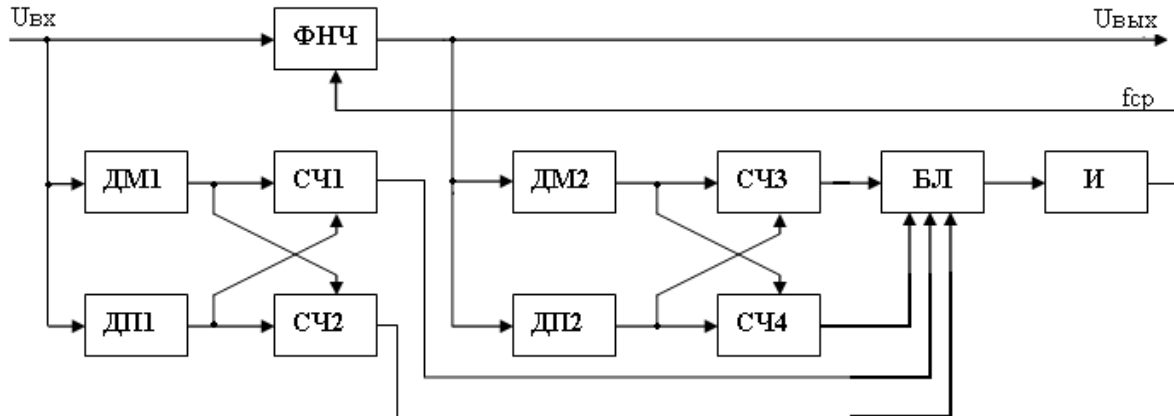


Рис. 2. Структура цепи регулирования фильтра низких частот:
И – интегратор, **ДП** – датчик пребывания сигнала в положительной фазе, **ДМ** – датчик пребывания сигнала в отрицательной фазе; **СЧ1** – **СЧ4** – счетчики интервалов времени; **БЛ** – блок логики

В качестве ФНЧ используется фильтр Баттерворта третьего порядка с передаточной функцией:

$$W(h) = \frac{1}{(Tp + 1)(T^2 p^2 + Tp + 1)},$$

где T – постоянная времени, с.

Фильтр и регулятор реализуются в цифровом виде, в частности, структура фильтра имеет вид, показанный на рис. 3.

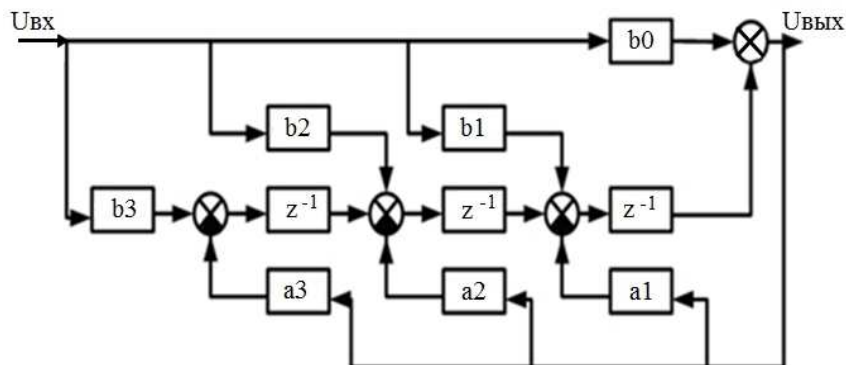


Рис. 3. Структура цифрового фильтра Баттерворта

Коэффициенты рекуррентного уравнения a_i и b_i вычисляются на каждом шаге решения. При работе предлагаемого устройства управляющий сигнал на перестройку фильтра можно сформировать только после прохождения первого полупериода доминирующего ритма, и время регулирования получается несколько больше, чем в известном устройстве [2]. Это не влияет на точность работы устройства, поскольку все равно процесс настройки происходит до предъявления стимула.

Применение предлагаемого устройства, позволяющего одновременно регистрировать единичные реализации зрительных и когнитивных вызванных потенциалов открывает возможность сопоставления сенсорного и когнитивного ответов.

На базе ГУЗ ТО КДЦ «Тульская областная клиническая больница» проводятся экспериментальные исследования (группа состоит из 40 человек) по регистрации указанных реакций при различной когнитивной нагрузке – мысленный счет, определение направления, цвета экрана, размера фигуры, определение скорости. Когнитивный стимулятор, предъявляет пациенту вербальные и знаковые стимулы (например, слова «вверх», «вниз», «влево», «вправо», порядковые числительные, геометрические фигуры и цвета спектра). Часть экспериментальных данных получена. В настоящее время ведется их обработка.

В данной статье представлены новый способ и устройство для регистрации вызванных потенциалов. Предложенный способ позволит увеличить быстродействие распознавания формируемой мозгом команды. Актуальной представляется задача построения нейроинтерфейса на базе описанного устройства.

Список литературы

1. Опыт применения вызванных потенциалов в клинической практике / под ред. В.В. Гнездицкого, А.М. Шамшиновой. М.: АОЗТ «Антидор», 2001. 480 с.
2. Жеребцова В.А., Индюхин А.Ф., Соколов Э.М., Хадарцев А.А., Васильев В.П., Морозов В.И. Способ диагностики длиннолатентного вызванного потенциала мозга и устройство для его осуществления // Патент РФ № 2240036 от 20.11.2004 г.

Томашвили Анна Валерьевна, аспирант, tomashvili_anna@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

APPLICATION OF TECHNOLOGY FOR RECORDING EVOKED POTENTIALS
IN THE DEVELOPMENT OF NEUROINTERFACES

A.V. Tomashvili

The article deals with the application of technology recording evoked potentials in developing neurointerfaces. The paper considers a method and a device for registration of evoked potentials, based on the use of self-tuning filters, which distinguishes from the EEG dominant rhythm. The new material on the researched theme generalized.

Key words: neurointerface, bioengineering system, electroencephalogram, the evoked potential, the self-tuning filter, the dominant rhythm.

Tomashvili Anna Valeryevna, postgraduate, tomashvili_anna@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ КОРРЕКЦИИ ПОКАЗАНИЙ БИНС ПО СИГНАЛАМ СНС

А.В. Прохорцов

Рассмотрена интегрированная система ориентации и навигации (ИСОН) высокоманевренного летательного аппарата (ЛА) с малым временем полета, построенная по разностной схеме комплексирования. Получены аналитические зависимости, дающие наглядное представление о механизме уменьшения погрешностей ИСОН при использовании различных типов коррекции показаний бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) в соответствии с сигналами аппаратуры спутниковой навигационной системы (СНС) и позволяющие оценить степень эффективности различных типов коррекции. Показано, что введение коррекции показаний БИНС по параметрам ориентации летательного аппарата, определенных с помощью СНС, в дополнение к позиционно-скоростной коррекции позволяет либо уменьшить частоту введения коррекции, при сохранении заданной точности, что равносильно увеличению надежности и помехозащищенности ИСОН, либо повысить точность определения координат, при заданном числе коррекций.

Ключевые слова: бесплатформенная инерциальная навигационная система, спутниковая навигационная система, коррекция, координаты, скорость, параметры ориентации, эффективность.

Рассмотрена ИСОН, установленная на ЛА с малым временем полета и предназначенная для определения координат местоположения ЛА в неподвижной нормальной системе координат $O_0X_gY_gZ_g$. При исследовании работы будем использовать системы координат показанные на рис.1 [1].

В состав ИСОН входит БИНС, построенная на гироскопических датчиках угловой скорости (ДУС) и акселерометрах неинерциального класса, и аппаратура СНС, определяющая координаты, скорость полета и параметры ориентации ЛА, и предназначенная для коррекции показаний

БИНС с целью получения требуемой точности определения координат ЛА.

Целью исследования является оценка эффективности различных типов коррекции (коррекция по координатам, коррекция по скорости, коррекция по параметрам ориентации) показаний БИНС

Пусть на ЛА действуют ускорения проекции на оси нормальной подвижной системы координат (СК) (см. рис.1) запишем в виде:

$$A_g = \begin{vmatrix} a_{xg} \\ a_{yg} \\ a_{zg} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

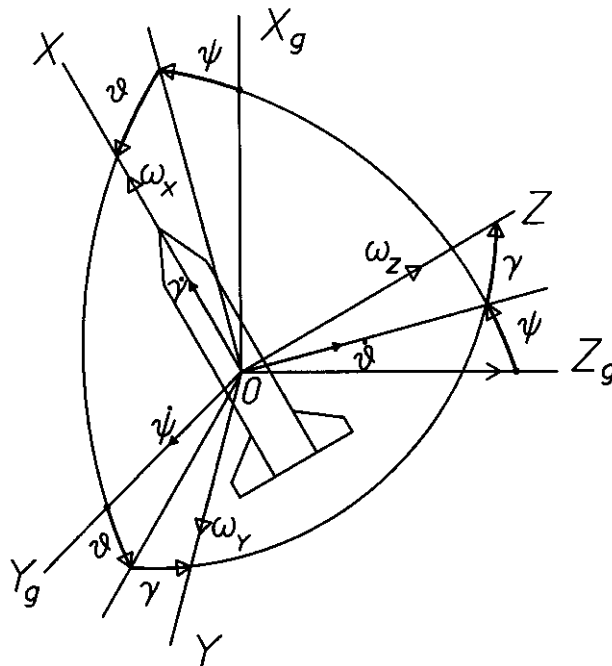


Рис. 1. Системы координат, используемые при исследовании работы ИСОН: а - нормальная подвижная система координат $OX_g Y_g Z_g$ (движется вместе с объектом): точка O совпадает с центром масс объекта; ось OY_g - направлена вверх по линии местной вертикали; ось OZ_g - лежит в горизонтальной плоскости по касательной к параллели на восток; ось OX_g - лежит в горизонтальной плоскости по касательной к меридиану на север; б - Связанная система координат $OXYZ$: точка O совпадает с центром масс объекта; ось OX - направлена по продольной оси объекта; ось OY - лежит в плоскости симметрии объекта, нормально оси OX ; ось OZ - перпендикулярно плоскости симметрии, в сторону правого крыла

Положение связанной системы координат по отношению к нормальной подвижной определяется углами Эйлера-Крылова (угол курса ψ , тангажа ϑ , крена γ) или матрицей направляющих косинусов:

$$C_g = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \vartheta & \sin \gamma \sin \psi - \cos \gamma \cos \psi \sin \vartheta & \cos \gamma \sin \psi + \cos \psi \sin \gamma \sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \cos \gamma & -\cos \vartheta \sin \gamma \\ -\sin \psi \cos \vartheta & \sin \gamma \cos \psi + \cos \gamma \sin \psi \sin \vartheta & \cos \psi \cos \gamma - \sin \gamma \sin \psi \sin \vartheta \end{pmatrix}.$$

Тогда проекции ускорения ЛА на оси связанной СК:

$$A = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = C_g^T \cdot A_g, \quad (2)$$

где C_g^T - матрица определяющая положение нормальной подвижной СК относительно связанной СК, определяется как транспонированная матрица C_g .

Показания акселерометров представим в виде:

$$A_{приб} = \begin{pmatrix} a_{x_приб} \\ a_{y_приб} \\ a_{z_приб} \end{pmatrix} = A + \Delta A, \quad (3)$$

где $\Delta A = \begin{pmatrix} \Delta a_x \\ \Delta a_y \\ \Delta a_z \end{pmatrix}$ - погрешности акселерометров.

Погрешности в измерении параметров ориентации, обусловленные погрешностями ДУСов представим как:

$$\Delta C_g = \begin{pmatrix} \cos \Delta \psi \cos \Delta \vartheta & \sin \Delta \gamma \sin \Delta \psi - \cos \Delta \gamma \cos \Delta \psi \sin \Delta \vartheta & \cos \Delta \gamma \sin \Delta \psi + \cos \Delta \psi \sin \Delta \gamma \sin \Delta \vartheta \\ \sin \Delta \vartheta & \cos \Delta \vartheta \cos \Delta \gamma & -\cos \Delta \vartheta \sin \Delta \gamma \\ -\sin \Delta \psi \cos \Delta \vartheta & \sin \Delta \gamma \cos \Delta \psi + \cos \Delta \gamma \sin \Delta \psi \sin \Delta \vartheta & \cos \Delta \psi \cos \Delta \gamma - \sin \Delta \gamma \sin \Delta \psi \sin \Delta \vartheta \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $\Delta \psi$, $\Delta \vartheta$, $\Delta \gamma$ - погрешности в определении углов курса, тангажа, крена.

Уравнение ошибок ориентации имеет вид [2]

$$\Delta \dot{C}_g = \Delta C_g \Omega_c + C_g \Delta \Omega_c, \quad (5)$$

где $\Delta \Omega_c$ матрица погрешностей ДУС в измерении угловых скоростей:

$$\Delta \Omega_c = \begin{pmatrix} 0 & -\Delta \omega_z & \Delta \omega_y \\ \Delta \omega_z & 0 & -\Delta \omega_x \\ -\Delta \omega_y & \Delta \omega_x & 0 \end{pmatrix},$$

где $\Delta \omega_x$, $\Delta \omega_y$, $\Delta \omega_z$ - погрешности ДУСов. Решая матричное уравнение (5) можно определить погрешности определения параметров ориентации, обусловленные погрешностями ДУСов.

Приборные значения ускорений в нормальной подвижной системе координат:

$$A_{g_приб} = C_g \cdot \Delta C_g \cdot A_{приб}, \quad (6)$$

или с учетом (3): $A_{g_приб} = C_g \cdot \Delta C_g \cdot (A + \Delta A)$, а с учетом (2)

$$A_{g_приб} = \Delta C_g \cdot A_g + C_g \cdot \Delta C_g \cdot \Delta A. \quad (7)$$

Погрешность определения ускорения в нормальной подвижной системе координат будет $\Delta A_{g_приб} = A_g - A_{g_приб}$, а с учетом (7))

$$\Delta A_{g_приб} = (E - \Delta C_g) \cdot A_g - C_g \cdot \Delta C_g \cdot \Delta A, \quad (8)$$

где $E = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ - единичная матрица.

Тогда погрешность в определении координат:

$$\begin{vmatrix} \Delta X_g \\ \Delta Y_g \\ \Delta Z_g \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \int_0^t \int_0^t \Delta a_{xg_приб} \cdot dt \cdot dt \\ 00 \\ \int_0^t \int_0^t \Delta a_{yg_приб} \cdot dt \cdot dt \\ 00 \\ \int_0^t \int_0^t \Delta a_{zg_приб} \cdot dt \cdot dt \\ 00 \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Из выражений (8) видно, что погрешность измерения ускорения имеет две составляющие:

первая $\Delta A_{g_приб}^1 = (E - \Delta C_g) \cdot A_g$ обусловлена погрешностями в определении параметров ориентации а также условиями эксплуатации (действующими ускорениями);

вторая $\Delta A_{g_приб}^2 = -C_g \cdot \Delta C_g \cdot \Delta A$ обусловлена погрешностями акселерометров в измерении ускорения, погрешностями в определении параметров ориентации, а также условиями эксплуатации (угловым положением объекта).

Оценим степень влияния погрешностей в определении параметров ориентации и погрешностей в измерении ускорений в связанной системе координат на точность определения ускорений в нормальной подвижной системе координат.

Проанализируем выражение (8). Преобразуем его из матричной формы в алгебраическую. Тогда

$$\begin{aligned}\Delta a_{xg_приб} &= (1 - \Delta c_{11}) \cdot a_{xg} - \Delta c_{12} \cdot a_{yg} - \Delta c_{13} \cdot a_{zg} - \\ &\quad (c_{11} \cdot \Delta c_{11} + c_{12} \cdot \Delta c_{21} + c_{13} \cdot \Delta c_{31}) \cdot \Delta a_x - \\ &\quad - (c_{11} \cdot \Delta c_{12} + c_{12} \cdot \Delta c_{22} + c_{13} \cdot \Delta c_{32}) \cdot \Delta a_y - \\ &\quad - (c_{11} \cdot \Delta c_{13} + c_{12} \cdot \Delta c_{23} + c_{13} \cdot \Delta c_{33}) \cdot \Delta a_z; \\ \Delta a_{yg_приб} &= -\Delta c_{21} \cdot a_{xg} + (1 - \Delta c_{22}) \cdot a_{yg} - \Delta c_{23} \cdot a_{zg} - \\ &\quad (c_{21} \cdot \Delta c_{11} + c_{22} \cdot \Delta c_{21} + c_{23} \cdot \Delta c_{31}) \cdot \Delta a_x - \\ &\quad - (c_{21} \cdot \Delta c_{12} + c_{22} \cdot \Delta c_{22} + c_{23} \cdot \Delta c_{32}) \cdot \Delta a_y - \\ &\quad - (c_{21} \cdot \Delta c_{13} + c_{22} \cdot \Delta c_{23} + c_{23} \cdot \Delta c_{33}) \cdot \Delta a_z; \\ \Delta a_{zg_приб} &= -\Delta c_{31} \cdot a_{xg} - \Delta c_{32} \cdot a_{yg} + (1 - \Delta c_{33}) \cdot a_{zg} - \\ &\quad (c_{31} \cdot \Delta c_{11} + c_{32} \cdot \Delta c_{21} + c_{33} \cdot \Delta c_{31}) \cdot \Delta a_x - \\ &\quad - (c_{31} \cdot \Delta c_{12} + c_{32} \cdot \Delta c_{22} + c_{33} \cdot \Delta c_{32}) \cdot \Delta a_y - \\ &\quad - (c_{31} \cdot \Delta c_{13} + c_{32} \cdot \Delta c_{23} + c_{33} \cdot \Delta c_{33}) \cdot \Delta a_z,\end{aligned}\tag{10}$$

где $\Delta c_{11}, \Delta c_{12}, \Delta c_{13}, \Delta c_{21}, \Delta c_{22}, \Delta c_{23}, \Delta c_{31}, \Delta c_{32}, \Delta c_{33}$ - элементы матрицы ΔC_g ; $c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{21}, c_{22}, c_{23}, c_{31}, c_{32}, c_{33}$ - элементы матрицы C_g .

Примем что углы $\Delta\psi, \Delta\vartheta, \Delta\gamma$ малы и не превышают 5° , тогда можно ввести допущение, что $\cos \Delta\psi = 1$, $\cos \Delta\vartheta = 1$, $\cos \Delta\gamma = 1$, $\sin \Delta\psi = \Delta\psi$, $\sin \Delta\vartheta = \Delta\vartheta$, $\sin \Delta\gamma = \Delta\gamma$. Следовательно

$$\Delta C_g = \begin{pmatrix} 1 & \Delta\gamma \cdot \Delta\psi - \Delta\vartheta & \Delta\psi + \Delta\gamma \cdot \Delta\vartheta \\ \Delta\vartheta & 1 & -\Delta\gamma \\ -\Delta\psi & \Delta\gamma + \Delta\psi \cdot \Delta\vartheta & 1 - \Delta\gamma \cdot \Delta\psi \cdot \Delta\vartheta \end{pmatrix}.\tag{11}$$

Подставляя (11) в (10) и пренебрегая двойным и тройным произведением малых величин получим:

$$\Delta a_{xg_приб} = \Delta\vartheta \cdot a_{yg} - \Delta\psi \cdot a_{zg} - c_{11} \cdot \Delta a_x - c_{12} \cdot \Delta a_y - c_{13} \cdot \Delta a_z;$$

$$\Delta a_{yg_приб} = -\Delta\vartheta \cdot a_{xg} + \Delta\gamma \cdot a_{zg} - c_{21} \cdot \Delta a_x - c_{22} \cdot \Delta a_y - c_{23} \cdot \Delta a_z; \quad (12)$$

$$\Delta a_{zg_приб} = \Delta\psi \cdot a_{xg} - \Delta\gamma \cdot a_{yg} - c_{31} \cdot \Delta a_x - c_{32} \cdot \Delta a_y - c_{33} \cdot \Delta a_z,$$

Для объяснения физического смысла с учетом (5), с учетом малости углов в первом приближении примем, что: $\omega_x = \dot{\gamma}$, $\omega_y = \dot{\psi}$, $\omega_z = \dot{\vartheta}$. Тогда $\Delta\dot{\gamma} = \Delta\omega_x$, $\Delta\dot{\psi} = \Delta\omega_y$, $\Delta\dot{\vartheta} = \Delta\omega_z$.

$$\text{Следовательно, } \Delta\gamma = \int_0^t \Delta\omega_x \cdot dt, \quad \Delta\psi = \int_0^t \Delta\omega_y \cdot dt, \quad \Delta\vartheta = \int_0^t \Delta\omega_z \cdot dt.$$

Тогда выражения (12) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \Delta a_{xg_приб} &= \left(\int_0^t \Delta\omega_z \cdot dt \right) \cdot a_{yg} - \left(\int_0^t \Delta\omega_y \cdot dt \right) \cdot a_{zg} - \\ &\quad - c_{11} \cdot \Delta a_x - c_{12} \cdot \Delta a_y - c_{13} \cdot \Delta a_z; \\ \Delta a_{yg_приб} &= - \left(\int_0^t \Delta\omega_z \cdot dt \right) \cdot a_{xg} + \left(\int_0^t \Delta\omega_x \cdot dt \right) \cdot a_{zg} - \\ &\quad - c_{21} \cdot \Delta a_x - c_{22} \cdot \Delta a_y - c_{23} \cdot \Delta a_z; \\ \Delta a_{zg_приб} &= \left(\int_0^t \Delta\omega_y \cdot dt \right) \cdot a_{xg} - \left(\int_0^t \Delta\omega_x \cdot dt \right) \cdot a_{yg} - \\ &\quad - c_{31} \cdot \Delta a_x - c_{32} \cdot \Delta a_y - c_{33} \cdot \Delta a_z \end{aligned} \quad (13)$$

Первые два слагаемых в выражениях (12) и (13) это погрешности обусловленные погрешностями в определении параметров ориентации (т.е. погрешности ДУСов), а последние три слагаемых - погрешности обусловленные погрешностями акселерометров. Погрешности акселерометров не нарастают со временем, а погрешности в определении ориентации нарастают со временем.

Выражения (13) представим в виде:

$$\begin{aligned} \Delta a_{xg_приб} &= \Delta a_{xg_приб}^{\omega} + \Delta a_{xg_приб}^a; \\ \Delta a_{yg_приб} &= \Delta a_{yg_приб}^{\omega} + \Delta a_{yg_приб}^a; \\ \Delta a_{zg_приб} &= \Delta a_{zg_приб}^{\omega} + \Delta a_{zg_приб}^a, \end{aligned} \quad (14)$$

где $\Delta a_{ig_приб}^{\omega}$ - погрешности в определении ускорений в нормальной подвижной системы координат, обусловленные погрешностями ДУСов; $\Delta a_{ig_приб}^a$ - погрешности в определении ускорений в нормальной подвижной системе координат, обусловленные погрешностями акселерометров; i - x, y, z.

Выполним численную оценку (14):

Примем погрешности акселерометров $\Delta a_x, \Delta a_y, \Delta a_z = 0,001 \text{ м/с}^2$, погрешности в определении параметров ориентации достигают 1° (т.е. $0,017 \text{ рад}$). Примем, что элементы матрицы C_g могут достигать своего максимального значения т.е. 1.

Рассмотрим несколько типичных участков движения ЛА:

1. Разгонный участок: ускорения достигают 100 м/с^2 :

следовательно

$$\Delta a_{xg_приб_ДУС} = 1,7 \text{ м/с}^2; \Delta a_{xg_приб_АКС} = 0,001 \text{ м/с}^2.$$

2. Участок замедленного движения: ускорения $0,2 \text{ м/с}^2$: следовательно

$$\Delta a_{xg_приб_ДУС} = 0,0034 \text{ м/с}^2; \Delta a_{xg_приб_АКС} = 0,001 \text{ м/с}^2.$$

3. Поворот ЛА (вследствие поворота возникает центростремительное ускорение): ускорения 10 м/с^2 :

следовательно

$$\Delta a_{xg_приб_ДУС} = 0,17 \text{ м/с}^2; \Delta a_{xg_приб_АКС} = 0,001 \text{ м/с}^2.$$

4. Движение с постоянной скоростью: ускорение 0 м/с^2 .

следовательно

$$\Delta a_{xg_приб_ДУС} = 0 \text{ м/с}^2; \Delta a_{xg_приб_АКС} = 0,001 \text{ м/с}^2.$$

Как видно, только для случая движения с постоянной скоростью, погрешность определения ускорений в нормальной подвижной системе координат, обусловленная погрешностями акселерометров выше чем погрешность - обусловленная погрешностями определения параметров ориентации. Но ясно, что при движении ЛА на него практически всегда действовать ускорение.

Т.о. основной погрешностью в ускорений в нормальной подвижной системе координат (14), а также в определении координат (9) будет являться погрешность в определении параметров ориентации, следовательно ее необходимо устранять.

С учетом выражений (14) погрешность в определении координат (9) представим в виде:

$$\begin{aligned} \Delta X_g &= \int_0^t \int_0^t \Delta a_{xg_приб} \cdot dt \cdot dt = \Delta X_g^\omega + \Delta X_g^a; \\ \Delta Y_g &= \int_0^t \int_0^t \Delta a_{yg_приб} \cdot dt \cdot dt = \Delta Y_g^\omega + \Delta Y_g^a; \\ \Delta Z_g &= \int_0^t \int_0^t \Delta a_{zg_приб} \cdot dt \cdot dt = \Delta Z_g^\omega + \Delta Z_g^a, \end{aligned} \quad (15)$$

где Δi_g^ω - погрешности в определении координаты i (i - X, Y, Z), обуслов-

ленные погрешностями ДУСов; Δi_g^a - погрешности в определении координаты i (i - X, Y, Z), обусловленные погрешностями акселерометров; i - x, y, z.

Для сокращения записей рассмотрим только погрешность в определении координаты X_g (для Y_g и Z_g аналогично)

$$\Delta X_g = \Delta X_g^\omega + \Delta X_g^a, \quad (16)$$

где (с учетом (13))

$$\Delta X_g^\omega = \int_0^t \int_0^t \left(\left(\int_0^t \Delta \omega_z \cdot dt \right) \cdot a_{yg} - \left(\int_0^t \Delta \omega_y \cdot dt \right) \cdot a_{zg} \right) \cdot dt \cdot dt;$$

$$\Delta X_g^a = \int_0^t \int_0^t \left(-c_{11} \cdot \Delta a_x - c_{12} \cdot \Delta a_y - c_{13} \cdot \Delta a_z \right) \cdot dt \cdot dt.$$

Полученные выражения (16) наглядно демонстрирует степень влияния различных параметров и характеристик на погрешности в определении пройденного ЛА пути за некоторый промежуток времени. Видно, что погрешность в определении координаты ΔX_g^ω , обусловленная погрешностями ДУС, нарастает быстрее, чем погрешность ΔX_g^a , обусловленная погрешностями акселерометров.

Проведем оценку эффективности использования в ИСОН различной информации (типа коррекции БИНС от СНС) получаемой от аппаратуры от СНС. Для сокращения записей будем рассматривать только погрешность в определении координаты X, для Y и Z аналогично [3].

Погрешности в определении координаты X_g после момента времени t_1 можно представить с учетом (16) в виде (при условии, что начальные условия известны без погрешностей):

$$\Delta X_g = \int_{t_1}^t \int_{t_1}^t (\Delta a_{xg_нпуб}^a + \Delta a_{xg_нпуб}^\omega) \cdot dt \cdot dt +$$

$$+ \int_{t_1}^t (\Delta V_{xg_нпуб}^a + \Delta V_{xg_нпуб}^\omega) \cdot dt + (\Delta X_{g_{t_1}}^a + \Delta X_{g_{t_1}}^\omega) \quad (17)$$

где

$$\begin{cases} \Delta a_{xg_нпуб}^a = -c_{11} \cdot \Delta a_x - c_{12} \cdot \Delta a_y - c_{13} \cdot \Delta a_z, \\ \Delta a_{xg_нпуб}^\omega = \left(\int_0^t \Delta \omega_z \cdot dt \right) \cdot a_{yg} - \left(\int_0^t \Delta \omega_y \cdot dt \right) \cdot a_{zg}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta V_{xg_приб\,t_1}^a = \int_0^{t_1} \Delta a \cdot \cos(\psi + \varphi_1) \cdot dt, \\ \Delta V_{xg_приб\,t_1}^a = \int_0^{t_1} -\Delta \psi \cdot a \cdot \cos(\psi - \varphi_2) \cdot dt, \\ \Delta X_{g\,t_1}^a = \int_0^t \int_0^t (-c_{11} \cdot \Delta a_x - c_{12} \cdot \Delta a_y - c_{13} \cdot \Delta a_z) \cdot dt \cdot dt, \\ \Delta X_{g\,t_1}^\omega = \int_0^t \int_0^t \left(\left(\int_0^t \Delta \omega_z \cdot dt \right) \cdot a_{yg} - \left(\int_0^t \Delta \omega_y \cdot dt \right) \cdot a_{zg} \right) \cdot dt \cdot dt. \end{cases}$$

В выражении (17) первое слагаемое характеризует погрешность в определении координаты X_g накопленную с момента времени t_1 до текущего момента времени t - эта погрешность нарастает пропорционально двойному интегралу от времени t ; второе слагаемое характеризует погрешность в определении координаты X_g , обусловленную погрешностью знания скорости ($\Delta V_{xg_приб}$) на момент времени t_1 - эта погрешность нарастает пропорционально интегралу от времени t ; третье слагаемое - погрешность в определении координаты X_g , накопленная до момента времени t_1 - эта погрешность не зависит от времени t .

Рассмотрим эффективность применения той или иной коррекции. Предполагаем, что в момент введения коррекции производится обнуление погрешностей БИНС.

При введении коррекции по координате местонахождения УСП в момент времени t_1 , устраняется погрешность БИНС, накопившаяся на момент времени t_1 , т.е. в выражении (17) устраняется постоянная составляющая - третье слагаемое ($\Delta X_{g\,t_1}^a = 0$, $\Delta X_{g\,t_1}^\omega = 0$). Т.о. введение коррекции по координате позволяет уменьшить погрешность в определении координаты X_g на величину:

$$\Delta \Delta X_{g\,по_координате} = \int_0^{t_1} \int_0^{t_1} \Delta a_{xg_приб}^a \cdot dt \cdot dt + \int_0^{t_1} \int_0^{t_1} \Delta a_{xg_приб}^\omega \cdot dt \cdot dt.$$

При введении коррекции по скорости полета УСП устраняется погрешность в определении скорости, накопившаяся на момент времени t_1 ($\Delta V_{xg_приб\,t_1}^a = 0$, $\Delta V_{xg_приб\,t_1}^\omega = 0$). При этом погрешность в определении координаты X_g на момент времени $t > t_1$ уменьшается на величину пропорциональную текущему времени t , т.е. в выражении (17) устраняется

второе слагаемое. Т.о. введение коррекции по скорости позволяет снизить как саму погрешность в определении координаты X_g на величину

$$\Delta\Delta X_{g_{no_скорости}} = \int_{t_1}^t \left[\int_0^{t_1} \Delta a_{xg_приб}^a \cdot dt \right] \cdot dt + \int_{t_1}^t \left[\int_0^{t_1} \Delta a_{xg_приб}^\omega \cdot dt \right] \cdot dt, \text{ так и}$$

скорость нарастания этой погрешности.

При введении коррекции по углам устраняется погрешность накопившаяся в определении углов ψ , ϑ на момент времени t_1 ($\Delta\psi_{0-t_1} = 0$, $\Delta\vartheta_{0-t_1} = 0$). Рассмотрим вторую составляющую в первом слагаемом выражения (17):

$$\begin{aligned} \Delta a_{xg_приб}^\omega &= \left(\int_0^t \Delta\omega_z \cdot dt \right) \cdot a_{yg} - \left(\int_0^t \Delta\omega_y \cdot dt \right) \cdot a_{zg} = \\ &= \left[\int_0^{t_1} \Delta\omega_z \cdot dt + \int_{t_1}^t \Delta\omega_z \cdot dt \right] \cdot a_{yg} - \left[\int_0^{t_1} \Delta\omega_y \cdot dt + \int_{t_1}^t \Delta\omega_y \cdot dt \right] \cdot a_{zg} = \\ &= (\Delta\vartheta_{0-t_1} + \Delta\vartheta_{t_1-t}) \cdot a_{yg} - (\Delta\psi_{0-t_1} + \Delta\psi_{t_1-t}) \cdot a_{zg} \end{aligned}$$

где $\Delta\psi_{0-t_1}$, $\Delta\vartheta_{0-t_1}$ - погрешность в определении углов ψ , ϑ накопленная до момента времени t_1 , $\Delta\psi_{t_1-t}$, $\Delta\vartheta_{t_1-t}$ - погрешность в определении угла ψ , ϑ накопленная от момента времени t_1 до текущего момента времени t . Т.о. введение коррекции по углу позволяет уменьшить погрешность в определении координаты X_g на величину

$$\Delta\Delta X_{g_{no_углу}} = \int_{t_1}^t \left(\left[\int_0^{t_1} \Delta\omega_z \cdot dt \right] \cdot a_{yg} - \left[\int_0^{t_1} \Delta\omega_y \cdot dt \right] \cdot a_{zg} \right) \cdot dt \cdot dt, \text{ так и снизить}$$

скорость нарастания погрешности. Как было отмечено выше, погрешность в определении координаты X_g обусловленная погрешностями ДУСов является наибольшей, следовательно введение коррекции по углу является эффективным.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что реализация в ИСОН коррекции показаний БИНС по параметрам ориентации ЛА существенно снижает скорость увеличения погрешности в определении координат в интервале между коррекциями и дает возможность увеличить интервалы времени между коррекциями.

Моделирование на ПЭВМ работы ИСОН на ЛА совершающего полет в горизонтальной плоскости в течение 130 секунд показало, что в зависимости от типа коррекции для обеспечения заданной точности в определении координат ЛА необходима следующая периодичность введения коррекции (см табл. 1).

Таблица 1

Число коррекций БИНС

Тип используемой коррекции	Число коррекций за время полета	Периодичность введения коррекций
Коррекция только по координате	12	10 секунд
Коррекция по координате и по линейной скорости	6	20 секунд
Коррекция по параметрам ориентации	3	30 секунд
Коррекция по координате, по линейной скорости, по параметрам ориентации	1	65 секунд

Компьютерное моделирование подтвердило правильность вывода о том, что применение в ИСОН коррекции по параметрам ориентации получаемых от СНС, эффективней, чем использование коррекции по координатам и по линейной скорости. Снижение необходимого количества коррекций во время полета повышает надежность и автономность ИСОН.

Оценка достоверности результатов аналитических исследований и моделирования работы ИСОН на ПЭВМ выполнено путем испытаний созданного негабаритного макетного образца системы. Макетный образец состоит из блока инерциальных чувствительных элементов (БИЧЭ) (рис. 2) (три двухстепенных гиротаксметра ДУС ТУ, три акселерометра ДА-11), устройства сопряжения и ПЭВМ.

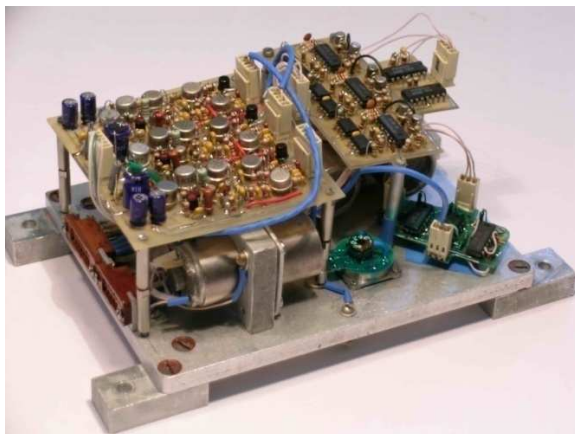


Рис.2. Внешний вид БИЧЭ



Рис. 3. БИЧЭ на динамическом стенде

Проведены экспериментальные исследования по оценке эффективности различных типов коррекции применяемых в ИСОН. Для этого БИЧЭ устанавливался на динамическом стенде (рис.3), воспроизводящем качку

по рысканью, тангажу и крену. В моменты введения коррекции использовалась следующая информация: при коррекции по координате вводились координаты местонахождения БИЧЭ, определенные до начала эксперимента и остающиеся в ходе эксперимента постоянными; при коррекции по линейной скорости вводились нулевые значения скорости, так как в ходе эксперимента БИЧЭ не перемещался; при коррекции по параметрам ориентации вводилась информация с датчиков стенда об угловом положении рабочей платформы стенда, на которой установлен БИЧЭ. Эксперимент подтвердил, что введение коррекции показаний БИНС по углам ориентации ЛА, определенных с помощью СНС, позволяет либо повысить точность определения координат, при сохранении заданной периодичности введения коррекции, либо уменьшить частоту введения коррекции, при сохранении заданной точности (см. табл. 2).

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований работы ИСОН

Тип коррекции показаний БИНС	Без коррекции	С коррекцией по координате	С коррекцией по координате и по скорости полета	С коррекцией параметров ориентации	С коррекцией по координате, по скорости полета и по параметрам ориентации	
Интервал между коррекциями, с	-	5	5	5	5	10
Погрешности в определении координат на 30 секунде, м	1200	556	110	98	40	84

Т.о. получены аналитические зависимости, дающие наглядное представление о механизме уменьшения погрешностей ИСОН при использовании различных типов коррекции показаний БИНС в соответствии с сигналами аппаратуры СНС и позволяющие оценить степень эффективности различных типов коррекции. Установлено, что введение коррекции показаний БИНС по углам ориентации ЛА, определенным с помощью СНС, позволяет либо уменьшить частоту введения коррекции, а следовательно, увеличить надежность работы ИСОН, либо повысить

точность определения координат, что подтверждено моделированием работы ИСОН на ПЭВМ и натурными испытаниями разработанного и изготовленного негабаритного макетного образца на динамическом стенде.

Список литературы

1. ГОСТ 20058-80. Динамика ЛА в атмосфере. Термины, определения и обозначения. М.: Изд-во стандартов, 1981. 52 с.
2. Ривкин С.С., Берман З.М., Окон И.М. Определение параметров ориентации объекта бесплатформенной инерциальной системой. СПб.: ГНЦ РФ - ЦНИИ «Электроприбор», 1996. 226 с.
3. Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В. Об эффективности различных типов коррекции показаний БИНС по сигналам СНС // XIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: Сборник материалов. С-Пб, 2006. С. 142-144.

Прохорцов Алексей Вячеславович, канд. техн. наук, доц., proxav@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF VARIOUS TYPES OF CORRECTION OF READING SINS OF SIGNALS SNA

A.V. Prohortsev

We consider an integrated system of orientation and navigation (IONS), you soko-manevrennogo - aircraft (AA) with a short flight , built -tion on the difference scheme aggregation . Analytical dependences , giving a visual representation of the mechanism of reduction of errors IONS with various types of correction of reading strapdown inertial navigation system (SINS), in accordance with the signals of the equipment -hand navigation satellite system (SNS) and to assess the effectiveness of various types of correction. It is shown that the introduction of correction by reading BINS orientation parameters of the aircraft defined by SNA , in addition to the position- speed correction can reduce the frequency of administration , or correction , while maintaining a predetermined accuracy, which is equivalent to an increase in reliability and immunity IONS or improve positioning accuracy , for a given number of corrections .

Key words: strapdown inertial navigation system , satellite navigation system , correction, position, velocity , orientation parameters , efficiency.

Prohortsev Alexei Vjacheslavovich, candidate of technical sciences, docent,, proxav@rambler.ru, Russia , Tula, Tula State University

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СГЛАЖИВАЮЩИХ СПЛАЙНОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ БИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ТРЕНАЖЕР ДЫХАТЕЛЬНОЙ МУСКУЛАТУРЫ – ПАЦИЕНТ»

Н.В. Ивахно

В статье рассмотрена методика сглаживания сплайном сигналов, полученных с датчика давления в дыхательном контуре пациента, показаны основные преимущества данного метода обработки в автоматизированных тренажерах дыхательной мускулатуры.

Ключевые слова: дыхательный тренажер, окончание вдоха, сплайн, угол наклона кривой давления.

При лечении дыхательной недостаточности часто используют методы механической респираторной поддержки и дыхательные тренажеры, реализуемые с помощью аппаратов искусственной вентиляции легких (ИВЛ), которые могут значительно повысить эффективность проводимой комплексной терапии. С развитием электроники и микропроцессорной техники стало возможным усовершенствование существующих тренажеров в направлении создания биоадаптивной системы управления с автоматической корректировкой режима работы с учетом параметров дыхательной системы пациента [1]. Это позволяет значительно расширить область применения тренажеров дыхательной мускулатуры в пульмонологии. Для построения систем такого типа на каждом этапе проектирования необходимо учитывать влияние обработки сигналов на результат управления. При этом важную роль выполняет предварительная обработка исходной информации, которая должна обладать следующими характеристиками: минимальным запаздыванием и искажением угла наклона сигнала, сглаживанием аномальных выбросов.

Разработанный тренажер дыхательной мускулатуры, который взаимосвязан с пациентом, включает в себя два уровня адаптации – на первом при самостоятельном дыхании происходит определение входных параметров шума и сигнала, характерных для различных видов заболеваний человека, которые необходимы для математической модели обработки сигнала при регистрации начала вдоха [2].

Второй уровень адаптации обеспечивает формирование обратной связи от пациента к тренажеру.

В результате принятия решения о начале вдоха пациента, осуществляется включение клапанов тренажера. При этом измеряемой характеристикой является дыхательный поток и давление на выходе системы «пациент-тренажер». Стандартные методы фильтрации сигнала изменяют угол наклона кривой, вследствие искажаются диагностические показатели, что

приведет к неправильным исходным данным для обеспечения регулирования тренажером.

Заданным требованиям отвечает обработка исходной зависимости с помощью сглаживающих сплайнов, которые, в отличие от интерполяционных, проходят вблизи значений функции [3]. Эффективные и, вместе с тем, легко реализуемые на ЭВМ алгоритмы таких сплайнов возникают при минимизации функционала

$$\Phi(\varphi) = \int_a^b [\varphi''(x)]^2 dx + \sum_{j=1}^N \rho_j^{-1} [\varphi(x_j) - y_j]^2,$$

где $\varphi(x_j)$ — значения сплайна в узлах x_j , $\rho_j > 0$ — найденные весовые коэффициенты, y_j — полученные экспериментальные значения сигнала, N — количество точек, выбранное для сглаживания. Если для некоторого номера j коэффициент $\rho_j = 0$, то $\varphi(x_j) = y_j$, т.е. в точке x_j значение сглаживающего сплайна совпадает со значением функции в этой точке.

Рассмотренная методика обработки кривой разности давлений была реализована в виде программы, основные результаты исследования представлены в виде графиков сглаживающих сплайнов при различных значениях $\rho_j = \rho$ (рис.1,2).

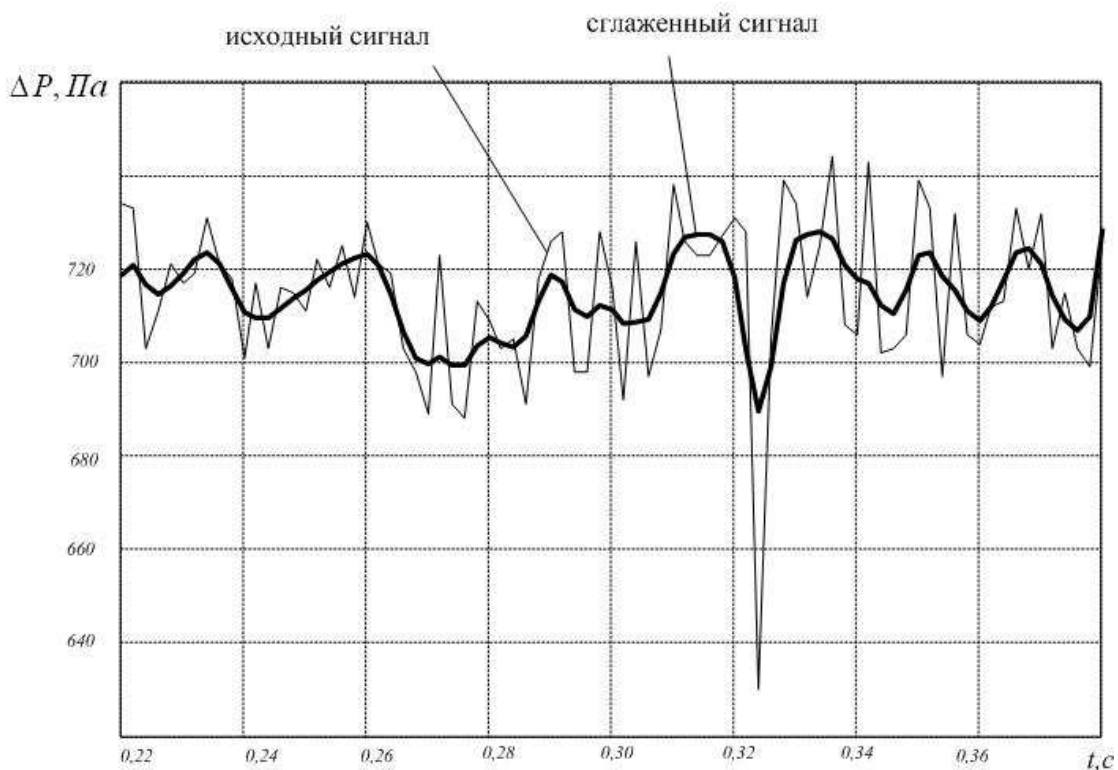


Рис.1. Результат сглаживания сплайнами на экспериментально полученных данных при $\rho = 0,1$

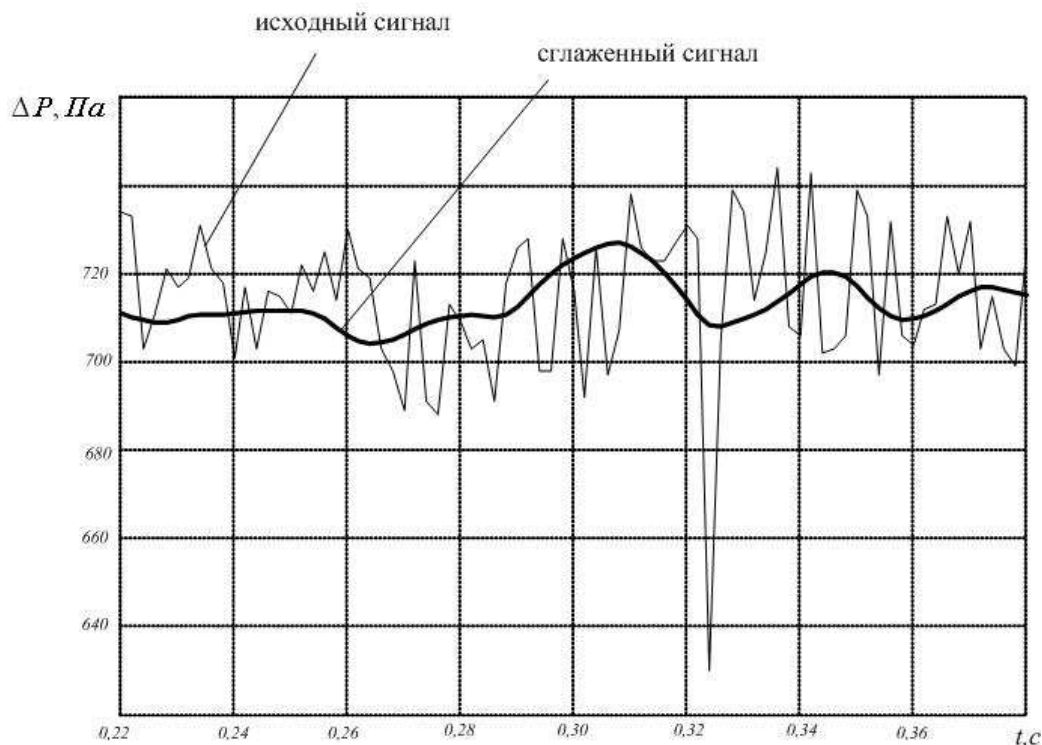


Рис.2. Результат сглаживания сплайнами на экспериментально полученных данных при $\rho = 0,2$

В результате анализа сглаженных и исходных значений функции была найдена величина весовых коэффициентов сплайна, равная $\rho = 0.2$, позволяющая обеспечить фильтрацию аномальных выбросов и минимальное искажение угла наклона сигнала с целью последующего линейного прогнозирования. Для обеспечения временных характеристик предварительной обработки получено количество точек, необходимое для сглаживания $N=64$.

Анализ полученных функциональных зависимостей показывает, что предложенный алгоритм обработки с найденными параметрами обеспечивает требуемые характеристики выходного сигнала, что позволяет его применять в блоке адаптивного управления аппаратом ИВЛ, тренажерах дыхательной мускулатуры. Результаты экспериментальных исследований показывают высокую степень синхронизации тренажера дыхательной мускулатуры к дыханию пациентов с различными заболеваниями легких.

Список литературы.

1. Патент РФ №115668 на полезную модель. МПК А61М 16/00. Дыхательный тренажер / Н.В. Ивахно, О.В. Меркулова. Опубл. 10.05.2012. Бюл. № 13.
2. Ивахно Н.В. Математическая модель обработки сигнала для определения начала инспираторной активности. VI международная научно-

техническая конференция: Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии, доклады, книга 1, Владимир -2004. С. 187-190.

З. Н. И. Терихова. Кубические сглаживающие сплайны// Математическое моделирование, 1990. Т. 2, № 8. С. 112–118.

Ивахно Наталья Валериевна, канд. техн. наук, доц., ivakhno@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

USE SMOOTHING SPLINES IN SIGNAL PROCESSING BIOTECHNICAL SYSTEM
«SIMULATOR RESPIRATORY MUSCLES – PATIENT»

N.V. Ivakhno

In the article the technique of smoothing spline signals received from the pressure sensor in the patient breathing circuit, shows the main advantages of this method of processing in automated simulators respiratory muscles.

Key words: breathing simulator, the end of inhalation, spline, the slope of the pressure curve.

Ivakhno Natalia Valerievna, candidate of technical science, docent, pbs.tula@ramler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

УДК 338.43:621.646.98

ВОЗМОЖНОСТЬ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ «ЭЛЕКТРОПРИВОД – ЗАПОРНАЯ АРМАТУРА» МЕТРОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Е.В. Плахотникова, В. Б. Протасьев

Рассмотрена возможность использования в системе «электропривод – запорная арматура» современных датчиков линейных и угловых перемещений и демпфирующих элементов с целью повышения их функциональных характеристик, конкурентоспособности и качества.

Ключевые слова: электроприводная запорная арматура, динамические нагрузки, электродинамический момент, датчики линейных и угловых перемещений.

В работах [1, 2] на основе теоретических и экспериментальных исследований показано, что мощность электроприводов, обеспечивающих перемещение и закрытие запорной арматуры, можно значительно снизить. Конкурентные преимущества такого решения очевидны и не требуют дополнительных пояснений.

Факторами, которые способствуют снижению мощности, необходимо строго учитывать при расчетах системы «электропривод – запорная арматура» являются:

время запаздывания сигнала на отключение асинхронного электродвигателя, обусловленное временем срабатывания микропереключателей, пусковой аппаратуры, реле и т.д.;

инерция, которую электропривод передает на запорный клапан с момента отключения до полной остановки.

Кроме отмеченных факторов необходимо правильно определить места расположения путевых выключателей, их технические характеристики и возможности получения измерительной информации в виде пройденного клапаном пути или соответствующего угла поворота ротора двигателя, или силового винта.

На рис. 1 показана типовая принципиальная схема системы «электропривод – запорная арматура». Такая схема включает асинхронный

электродвигатель (поз.1), вал которого посредством муфты соединен с червяком (К), который вместе с колесом (Z) образует самотормозящую червячную передачу. Далее вращение передается на вал (поз. 4), на винт (поз. 5), который перемещает клапан (поз.6) и обеспечивает его прилегание к седлу (поз.7) корпуса запорной арматуры.

Червяк (К) имеет возможность осевого перемещения, поэтому он сжимает пружину (поз.3), а конечные выключатели (поз.2) срабатывают на отключение двигателя, когда он обеспечивает необходимый момент настройки $M_{н.зак.}$

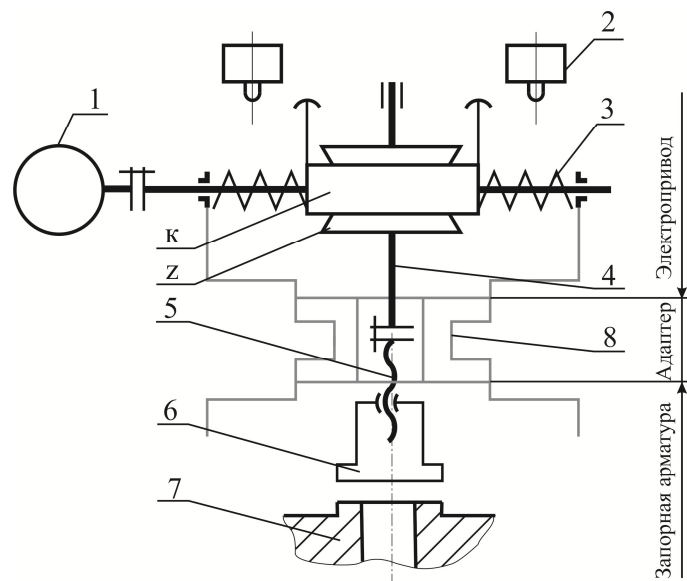


Рис. 1. Типовая кинематическая схема электродинамической системы «электропривод – запорная арматура»

Далее срабатывает в течение времени Δt_1 пусковая аппаратура и спустя некоторое время Δt_2 двигатель останавливается, передав свои инерционные возможности и обеспечив результирующий электродинамический момент ($M_{эл.дин.}$) [2].

Сразу отметим нерациональность схемы в том, что она использует пружины сжатия (поз.3). На сжатие пружин расходуется почти такая же мощность, как и на вращение червячного колеса (Z). Минимизировать мощность электродвигателя при такой схеме проблематично.

Возвращаясь к схеме (рис.1), отметим, что между корпусом электропривода и корпусом запорной арматуры, все чаще устанавливают т.н. адаптер (поз.8), который аккумулирует использованную при закрытии клапана часть энергии, обеспечиваемой инерционными эффектами при остановке двигателя.

В работе [2] установлено, что зависимость $M_n = f(M_{эл.дин.})$ носит линейный характер (рис.2) и описывается функцией:

$$M_{н.эл.дин.} = M_{н.зак} - tg\mu (M_{эл.дин.} - M_{зак.}), \quad (1)$$

где $M_{н.эл.дин.}$ - величина крутящего момента настройки электропривода на отключение при выполнении рабочего цикла «открыто – закрыто» заданная с учетом электродинамической поправки системы, зависящей от жесткости, инерции и времени запаздывания системы при отключении электродвигателя [2]; $M_{н.зак.}$ – расчетное значение крутящего момента настройки электропривода на отключение при выполнении рабочего цикла «открыто – закрыто» назначенное в результате статического силового расчета запорной арматуры без учета электродинамической поправки системы; $M_{эл.дин.}$ – электродинамический крутящий момент развиваемый системой при полной остановке при ее настройке по значению крутящего момента закрытия $M_{н.зак.}$; $M_{зак.}$ – крутящий момент закрытия, прописанный в ТУ на запорную арматуру и необходимый для герметичного перекрытия трубопровода при выполнении рабочего цикла «открыто – закрыто» значение которого обеспечивается при настройке электропривода на отключение по значению крутящего момента $M_{н.эл.дин.}$; μ - угол наклона линии, показывающей изменение электродинамического крутящего момента системы «электропривод - запорная арматура» $f(M_{эл.дин.})$ к оси абсцисс, в системе координат ($M_{эл.дин.}$; M_n).

Значение угла можно определить из следующей зависимости:

$$tg\mu = \frac{M_{н2} - M_{н1}}{M_{эл.дин.2} - M_{эл.дин.1}} \quad (2)$$

где $M_{н1}$, $M_{н2}$ – значения крутящих моментов настройки электропривода на отключение принятые для экспериментального определения значений электродинамических моментов системы «электропривод – запорная арматура»; $M_{эл.дин.1}$, $M_{эл.дин.2}$ – значения электродинамических моментов системы зафиксированных при экспериментальных исследованиях.

Определить вышеуказанные значения можно путем дополнения электропривода электронным блоком управления, например блоком AUMATIC AC 01.2 Non-intrusive, который позволяет фиксировать значения крутящих моментов, развиваемых системой при полной остановке, даже после отключения электродвигателя привода.

Рассмотрим три варианта электродинамических систем «электропривод – запорная арматура» представленные на рис.2.

За основу анализа примем соотношение между крутящими моментами настроек электропривода на отключение (M_n) и результирующими электродинамическими моментами ($M_{эл.дин.}$).

На рисунке 2а, представлен график изменения крутящего момента системы «электропривод – запорная арматура», при функционировании которой результирующий электродинамический момент соответствует крутящему моменту, заданному при настройке электропривода на отключение:

$$M_n = M_{эл.дин.} \quad (3)$$

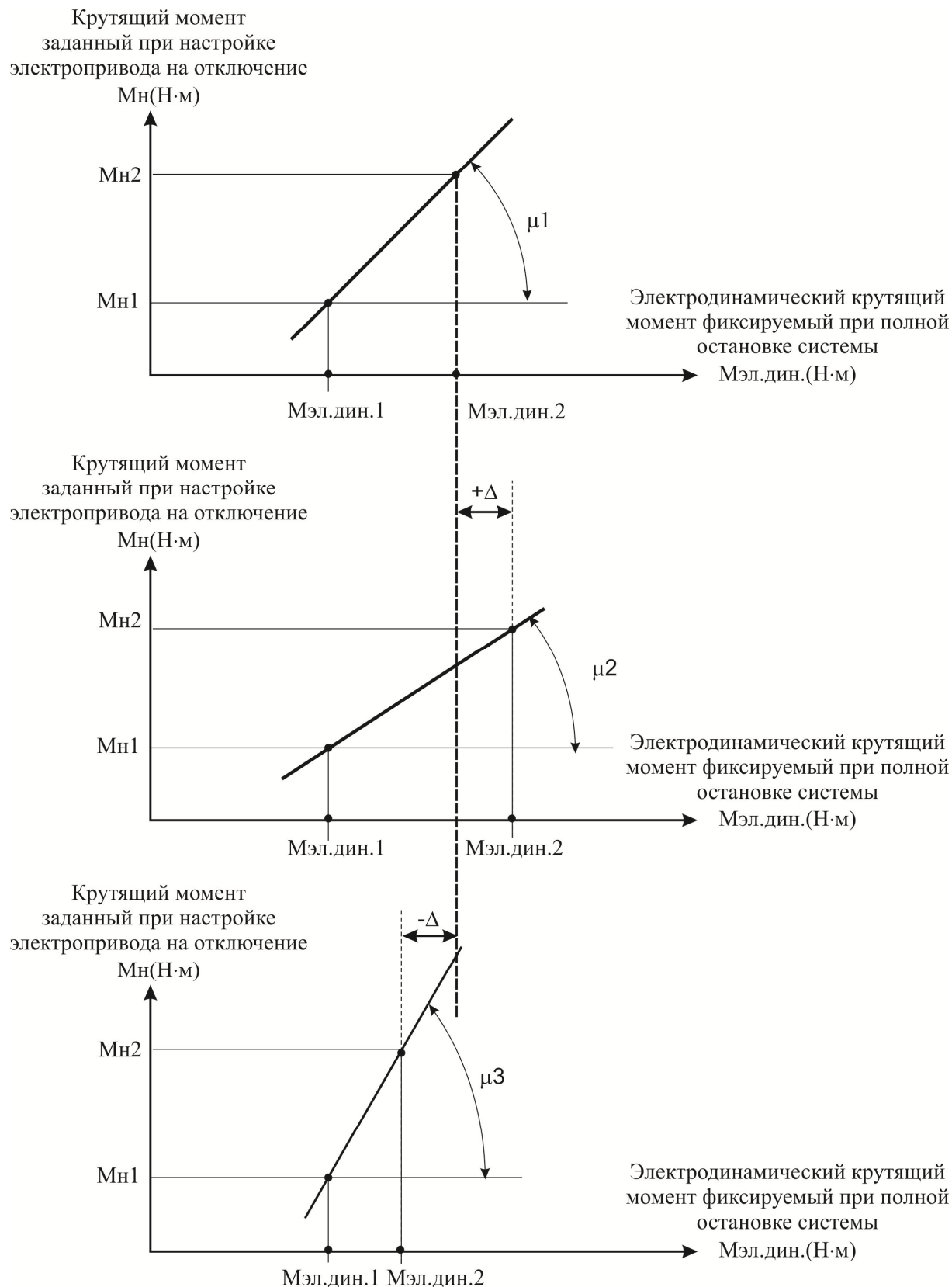


Рис. 2. Варианты соотношений настроечных (M_n) и электродинамических результирующих моментов ($M_{эл.дин.}$) в системе «электропривод-запорная арматура»

Представленный вариант (рис. 2, а) возможен только при отсутствии временных задержек при отключении электродвигателя и инерционных моментов при остановке системы. Случай гипотетичен и не является наиболее рациональным, но примем его за точку отсчета (базу) для анализа других вариантов (рис. 2, б-в).

Обычно значение результирующего электродинамического момента $M_{эл.дин.}$, фиксируемое при полной остановки системы, превышает значение крутящего момента настройки электропривода на отключение $M_{н.зак.}$ [2] (рис. 2, б).

$$M_n < M_{эл.дин.} \quad (4)$$

Данный вариант (рис.2б) описывает реальное состояние электродинамической системы, для которой характерны и временные задержки, связанные с гистерезисом элементов входящих в систему управления, и инерционный момент. Рассогласование входных и выходных характеристик, может быть выгодным, если значение момента настройки электропривода на отключение рассчитано корректно, с учетом электродинамической поправки [2]. В этом случае, за счет рационального использования электродинамических возможностей привода значение крутящего момента необходимого для уплотнения запорной арматуры $M_{зак}$ можно достичь электроприводом меньшей мощности, что предотвращает чрезмерные нагрузки, возникающие в запорной арматуре под действием электропривода [3].

Третий вариант (рис.2в) описывает ситуацию, при которой значение электродинамического момента системы меньше значения крутящего момента, заданного при настройке электропривода на отключение:

$$M_n > M_{эл.дин.} \quad (5)$$

Причина такого поведения системы, очевидно, заложена в нерациональности конструкции: ее низком к.п.д. и скоротечных динамических процессах.

Анализируя графики (рис. 2) можно сделать несколько выводов.

Первый вывод состоит в том, что для надежного функционирования электродинамической системы «электропривод – запорная арматура» значение угла μ должно быть меньше 45° . Его рациональную величину можно определить, составив баланс выполненной приводом работы и определения условия, при котором ее величина минимально достаточна.

В качестве второго вывода отметим, что при проектировании и изготовлении системы «электропривод – запорная арматура» необходимо учитывать значение μ , которое является ее важной электродинамической характеристикой и позволяет при необходимости обосновать возможное снижение силовых характеристик и использование менее мощных электроприводов.

Определив возможные соотношения настроечных и электродинамических моментов системы и обозначив причины, при которых возмож-

ны представленные ситуации, рассмотрим механизм отключения электродвигателя, поскольку ранее нами отмечено, что места расположения путевых выключателей имеют важное значение.

В качестве примера проанализируем гипотетическую систему, изображенную схематично на рисунке 3.

Отличительными признаками схемы является отсутствие пружин (рис. 1) и использование бесконтактных более точных и менее склонных к гистерезису датчиков, вместо контактных путевых выключателей

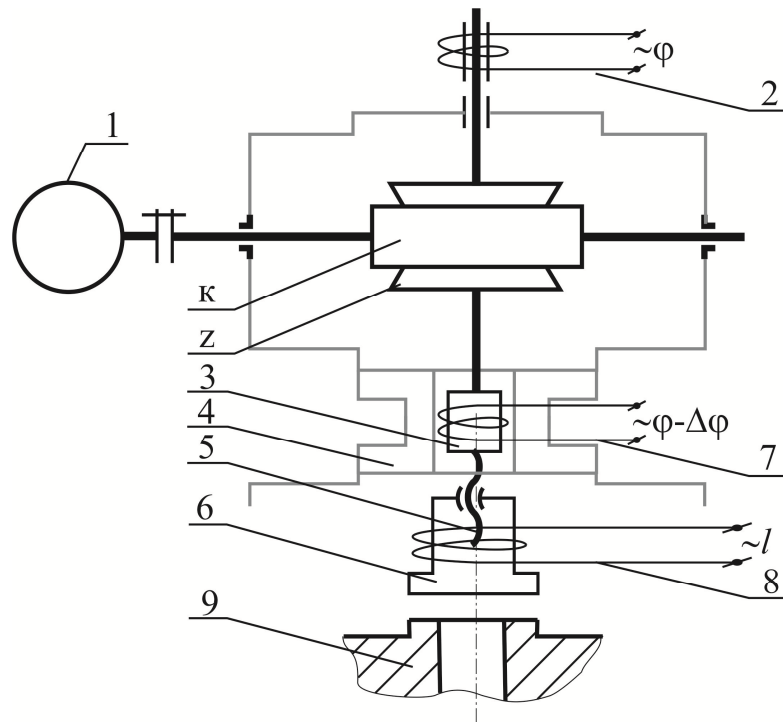


Рис. 3. Схема возможного расположения бесконтактных датчиков

Представленная система (рис. 3) также как и в предыдущем случае (рис. 1) состоит из асинхронного электродвигателя (поз.1), червячной передачи ($\frac{K}{Z}$), адаптера (поз.4), ходового винта (поз. 5) снабженного демпфирующим элементом (поз.3), клапана (поз.6) и седла (поз.9).

В схеме (рис.3) использованы:

датчик регистрирующий угол поворота φ червячного колеса (поз.2);

датчик регистрирующий угол поворота $\varphi-\Delta\varphi$ ходового винта (поз.5);

датчик регистрирующий путь l клапана (поз.8).

Все перечисленные датчики бесконтактные, использующие принцип индукосина [4], введены нами в систему для регистрации указанных выше параметров с момента отключения электродвигателя до полной остановки электродинамической системы «электропривод –запорная арматура».

Такие датчики широко используются в станках с ЧПУ и показали высокую точность и надежность эксплуатации. Каждый из введенных датчиков может выполнять функцию управления электродвигателем, что и происходит в станках с ЧПУ.

Проанализируем возможности (информативность) каждого из перечисленных датчиков (рис.3).

Датчик 2 регистрирует угол поворота φ , что в принципе равноценно использованию путевых выключателей на рис.1. Состояние системы в цепи «червячное колесо Z – седло клапан» с его помощью оценить не представляется возможным.

Датчик 7 регистрирует угол поворота демпфирующего устройства (поз.3), причем этот угол меньше угла φ , зафиксированного датчиком 2 на величину $\Delta\varphi$, которое обеспечивает демпфирующее устройство. Как и в предыдущем случае датчик 7, используемый в одиночку не дает информации о состоянии кинематической цепи ниже демпфирующего устройства.

Датчик 8, регистрирующий только ход клапана (поз.6), расположенный на конечном звене кинематической цепи, наиболее информативен с позиции прилегания клапана к седлу (поз.9) с необходимым усилием, но по его данным невозможно оценить состояние кинематической цепи от электродвигателя (поз.1) до клапана (поз.6).

Совместное использование датчиков 2,7 и 8 рационально на испытательных стендах, поскольку сравнивая их показатели можно оценить деформации всех участков системы и оптимизировать податливость всех ее звеньев.

Если такая задача решена в системе «электропривод – запорная арматура» рационально использовать только датчик 8, причем пружины 3 (рис.1) из конструкции необходимо исключить. Их функции будет выполнять демпфирующий элемент.

С одной стороны он обеспечит необходимую податливость и за счет закручивания на угол $\Delta\varphi$ необходимое усилие закрытия, с другой стороны за счет эффекта самоторможения запорная арматура произвольно не откроется.

Пружины (поз.3, рис.1), расположенные на валу червяка снижают надежность системы «электропривод – запорная арматура», поскольку снижают эффект самоторможения всей системы.

Обобщая изложенное отметим, что надежность функционирования системы «электропривод – запорная арматура» может быть повышена, за счет использования бесконтактных датчиков, расположенных непосредственно на исполнительном элементе системы (клапане).

Мощность электропривода можно снизить более чем вдвое, исключив демпфирующую пружину на входном валу червячной пары и за счет использования электродинамического момента.

Возражения, связанные с более высокой стоимостью бесконтактных датчиков, авторы не считают препятствием для использования, поскольку их мощность, а также и цена должна быть ниже, чем в станках с ЧПУ, а безопасность АЭС, в которых рассматриваемые системы используются, не нуждаются в комментариях.

Список литературы

1. Плахотникова Е. В. Динамические нагрузки в электроприводной арматуре /Елисеева Т. А.// Международный журнал «Трубопроводная арматура и оборудование» № 5 (62). 2012 С. 72-75.
2. Плахотникова Е.В. Повышение эффективности систем «запорная арматура - электропривод»/ Протасьев В.Б.// Изв. ТулГУ. Сер. Технические науки. Вып.6. Часть 1. Тула, ТулГУ, 2013, С. 142-152.
3. Шпаков О.Н. О расчете нагрузок в электроприводной арматуре// Межотраслевой журнал «Арматуростроение» № 5 (37). 2005 С. 48-51.
4. Федотов А.В. Автоматизация управления в производственных системах: Учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2001. 354 с.

Плахотникова Елена Владимировна, канд. техн. наук, доц., e_plahotnikova@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Протасьев Виктор Борисович, д-р техн. наук, проф., imstulgy@pochta.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

INCREASE OF EFFICIENCY OF SYSTEMS "STOP VALVES – THE ELECTRIC DRIVE" METROLOGICAL METHODS

E. V. Plahotnikova, V. B. Protasev

Possibility of use in system "the electric drive – stop valves " modern sensors of linear and angular movements and damping elements for the purpose of increase of their functional characteristics, competitiveness and quality is considered.

Key words: electrodriving stop valves, dynamic loadings, electrodynamics moment,, efficiency, sensors of linear and angular movements.

Plahotnikova Elena Vladimirovna, candidate of technical science, docent, e_plahotnikova@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Protasev Viktor Borisovich, doctor of technical science, professor, imstulgy@pochta.ru, Russia, Tula, Tula State University

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧИМОСТИ РАЗЛИЧИЙ В РЕЗУЛЬТАТАХ НАБЛЮДЕНИЙ ОБЪЕМОВ ПОТРЕБЛЕННОГО И ПОСТАВЛЕННОГО РЕСУРСА СТАТИСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Д.Б. Белов, С.И. Соловьев

Рассмотрена методика определения значимости различий в результатах наблюдений объемов потребленного и поставленного ресурса с использованием статистических методов.

Ключевые слова: объемы потребленного и поставленного ресурса, разбаланс объемов ресурса, различие результатов, статистические методы.

В процессе распределения и учета объемов поставляемого организациями-поставщиками и потребляемого физическими и юридическими лицами ресурса (нефтепродуктов, природного газа, электричества, воды и др.) достаточно часто возникают ситуации, когда по различным причинам учтенные обеими сторонами (поставщиком и потребителями) объемы не совпадают между собой как ежедневно, так и в сумме за некоторый отчетный период (обычно за месяц). Это напрямую относится и к расфасовке товаров, например продуктов питания. Если в систему распределения ресурса не вмешиваются сторонние участники (несанкционированное вмешательство), то никакой разницы между объемами отпущенного и потребленного ресурса теоретически быть не должно. Однако она есть практически всегда, даже когда нет несанкционированного вмешательства в работу системы ресурсоснабжения.

Такую разницу принято называть разбалансом объемов поставленного и потребленного ресурса или просто разбалансом:

$$V_p = V_{номр} - V_{номт}, \quad (1)$$

где $V_{номр}$ — объем потребленного ресурса; $V_{номт}$ — объем поставленного ресурса; V_p — разбаланс объемов потребленного и поставленного ресурса.

В связи с вышеизложенным, актуальной становится проблема выявления причин возникновения разбаланса и выработки мер по его минимизации. В работе [1] отмечается, что если абсолютная величина разбаланса $|V_p|$ меньше или равна его случайной погрешности ΔV_p (т.е. $|V_p| \leq \Delta V_p$), то следует признать, что разбаланс произошел вследствие причин случайного характера (вследствие погрешностей приборов учета объемов $V_{номр}$ и $V_{номт}$, наличие которых неизбежно). В противном случае, т.е. когда будет выполняться неравенство $|V_p| > \Delta V_p$, причину возникновения

разбаланса следует искать либо в серьезных неслучайных сбоях в работе средств учета, увеличении технологических потерь и авариях на линии, либо в несанкционированном вмешательстве в распределение ресурса третьей, помимо поставщика и потребителей стороны и т.п.

В работе [1] также указывается, что значение погрешности ΔV_p разбаланса следует определять в зависимости от погрешностей учета ресурса поставщиком $\Delta V_{пост}$ и потребителями $\Delta V_{потр}$:

$$\Delta V_p = \sqrt{(\Delta V_{пост})^2 + (\Delta V_{потр})^2} . \quad (2)$$

При этом погрешность $\Delta V_{потр}$ потребления ресурса зависит от погрешностей учета каждого потребителя:

$$\Delta V_{потр} = \sum \Delta V_{потр i} . \quad (3)$$

Следует отметить, что изложенное решение поставленной задачи является достаточно сложным, поскольку трудно (практически невозможно) оценить точность (погрешность $\Delta V_{потр i}$) результатов ежедневного потребления ресурса, т.к. каждый потребитель использует свои средства учета, сведения о точности которых зачастую бывают неизвестны поставщику, и потребляет свой индивидуальный объем ресурса.

Поэтому, если получить информацию о точности учета потребленного ресурса нет возможности, то можно применить следующий подход. Представим, что значения объемов ежедневной поставки и потребления, зафиксированные приборами поставщика и потребителей соответственно, являются результатами синхронных серий наблюдений одной и той же физической величины — объема поставленного в течение одного дня ресурса. На самом деле это не так, поскольку каждый день поставляется и потребляется физически неодинаковое количество ресурса. Однако, если чисто внешне исследуемые значения объемов будут напоминать поведение случайных (псевдослучайных) чисел, характеризующих результаты синхронных серий наблюдений одной и той же физической величины, то для анализа причин возникновения разбаланса можно будет использовать статистический метод сравнения двух средних в парных наблюдениях (парный критерий Стьюдента), изложенный в ГОСТ Р 50779.23-2005. Такой подход можно объективно применять только к результатам, полученным в климатически устойчивый (теплый и/или холодный) период года, когда потребление ресурса стабилизируется.

Для проверки «похожести» результатов учета на результаты серий синхронных наблюдений достаточно убедиться в том, что законы распределения вероятности результатов ежедневного учета объемов поставленного и потребленного ресурса, как и объемов разбаланса между ними будут соответствовать по виду нормальному закону (согласно центральной предельной теореме теории вероятности). Это позволяет обосновать анало-

гичность имитационного подхода к анализу разбаланса и обработки результатов серий синхронных наблюдений. В противном случае применить стандартные методы анализа результатов учета ресурса не удастся.

Следует отметить, что перед проверкой на нормальность законов распределения вероятности необходимо провести анализ результатов учета упомянутых объемов на наличие так называемых промахов (выбросов), которыми считаются результаты значимо отличающиеся от остальных элементов выборки наблюдений. Данную проверку несложно выполнить с помощью критерия Граббса, методика применения которого достаточно подробно изложена в ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002.

Для проверки на нормальность законов распределения вероятности результатов учета объемов поставленного и потребленного ресурса существует достаточно большое количество статистических критериев. Здесь, например, можно использовать такие критерии как Шапиро-Уилка (при числе наблюдений $n < 50$) и Пирсона (при большем числе наблюдений). Методики проверки с помощью этих критериев достаточно хорошо известны и, поэтому, останавливаться на них не будем.

Убедившись, что законы распределения вероятности значений объемов поставленного и потребленного ресурса соответствуют нормальному, можно проверить гипотезу о значимости разбаланса с помощью парного критерия Стьюдента. Рассмотрим его более подробно.

Согласно методике проверки по данному критерию сначала вычисляются разности (разбалансы) V_{pi} наблюдаемых пар значений объемов $V_{nomp\ i}$ и $V_{nosc\ i}$:

$$V_{pi} = V_{nomp\ i} - V_{nosc\ i}. \quad (4)$$

Затем определяются среднее арифметическое значение $\bar{V}_p$ и стандартное отклонение S_{V_p} этих разностей:

$$\bar{V}_p = \frac{\sum_{i=1}^n V_{pi}}{n}, \quad (5)$$

$$S_{V_p} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{pi} - \bar{V}_p)^2}{n-1}}, \quad (6)$$

Далее вычисляется величина параметра t :

$$t = \frac{|\bar{V}_p|}{S_{V_p}} \sqrt{n}, \quad (7)$$

и после этого ее значение сравнивается с критическим значением t_p , кото-

рое выбирается в зависимости от выбранного уровня доверия p (уровня значимости $\alpha = 1 - p$) и числа степеней свободы $k = n - 1$ (в данном случае n есть число пар значений объемов $V_{номр}$ и $V_{пост}$).

Если выполняется условие:

$$t < t_p, \quad (8)$$

то гипотеза о равенстве средних значений объемов потребленного $V_{номр}$ и поставленного $V_{пост}$ ресурса принимается, что говорит о незначимости расхождений в их результатах учета.

Значимое же различие средних значений $\bar{V}_{номр}$ и $\bar{V}_{пост}$ будет свидетельствовать о том, что на формирование значений исследуемых объемов оказывает влияние какой-либо неслучайный фактор или группа таких факторов которые устойчиво сдвигают результаты учета объемов ресурса поставщиком или потребителями в большую или меньшую сторону, и следует принять меры к их обнаружению и исключению или уменьшению.

В качестве примера рассмотрим данные по результатам ежедневного учета объемов потребленного и поставленного природного газа в одном из районов РФ за месяц. Эти данные приведены в таблице, из которой нетрудно заметить, что во всех случаях объем потребления превышает объем поставки ($V_{номр i} > V_{пост i}$), т.е. величина разбаланса (разностей V_{pi}) всегда положительна.

Сначала была проведена проверка на выбросы значений объемов $V_{номр i}$ и $V_{пост i}$ с помощью критерия Граббса, которая показала, что выбросы (промахи) в рядах наблюдении указанных объемов с уровнем значимости $\alpha = 0,05$ отсутствуют.

Кроме того, с помощью критерия Шапиро-Уилка была выполнена проверка на нормальность закона распределения вероятности значений разностей V_{pi} . Эта проверка показала, что данное распределение с тем же уровнем значимости соответствует нормальному закону. Результаты вышеуказанных расчетов в статье опущены из-за ограниченности ее объема.

Теперь рассмотрим проверку значимости расхождений результатов учета объемов потребленного и поставленного природного газа с помощью парного критерия Стьюдента.

Определим среднее арифметическое значение разностей V_{pi} (формула (2)):

$$\bar{V}_p = 66,1 \text{ м}^3.$$

По формуле (3) вычислим стандартное отклонение величин V_{pi} :

$$S_{V_p} = 22,93 \text{ м}^3.$$

Определим величину t по формуле (4):

$$t = \frac{66,1}{22,93} \sqrt{30} = 15,790.$$

**Результаты ежедневного учета объемов потребленного
и поставленного природного газа (в м³)**

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{ном\ p\ i}$	4636	4321	4499	4943	4945	4991	4956	5049	4669	4289
$V_{ном\ i}$	4622	4268	4469	4926	4909	4945	4913	5001	4615	4205
$V_{p\ i}$	14	53	30	17	36	46	43	48	54	84
№ п/п	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$V_{ном\ p\ i}$	4395	4615	5006	5149	5001	4295	4162	4682	4504	4584
$V_{ном\ i}$	4295	4528	4940	5075	4923	4212	4075	4631	4435	4525
$V_{p\ i}$	100	87	66	74	78	83	87	51	69	59
№ п/п	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$V_{ном\ p\ i}$	4610	4385	3881	4034	4508	4841	4775	4720	4371	3978
$V_{ном\ i}$	4533	4307	3793	3937	4425	4764	4712	4652	4296	3880
$V_{p\ i}$	77	78	88	97	83	77	63	68	75	98

Задавшись доверительной вероятностью (уровнем доверия) $p = 0,95$ (уровнем значимости $\alpha = 1 - 0,95 = 0,05$) при числе степеней свободы $k = 30 - 1 = 29$, определим критическое значение критерия Стьюдента: $t_{0,95} = 2,045$. Это значение можно определить из многих литературных источников, например [3].

Сравнивая расчетное значение критерия Стьюдента с критическим $t = 15,790 > t_{0,95} = 2,045$,

можно сделать вывод об отклонении с уровнем доверия $p = 0,95$ (уровнем значимости $\alpha = 0,05$) гипотезы о равенстве средних значений объемов $V_{ном\ p}$ и $V_{ном\ i}$ за исследуемый период времени.

Данному обстоятельству соответствует то, что результаты ежедневного учета объемов потребленного и поставленного природного газа расходятся значимо, т.е. неслучайно. Это служит сигналом поставщику к принятию незамедлительных мер по обнаружению и устранению причин такого различия.

В противном случае устойчиво уменьшить разбаланс не удастся ввиду случайности его характера.

В заключение следует отметить, что методика оценки расхождений

в результатах ежедневного учета объемов потребленного и поставленного ресурса, изложенная в данной статье проста, не требует большого объема вычислений и ее применение будет полезно многим организациям, занимающимся поставкой и реализацией различных ресурсов потребителям.

Список литературы

1. Белов Д.Б., Игнатъев А.А. Соловьев С.И. Проблема погрешности измерений при коммерческом учете ресурса (на примере поставки природного газа) // Методы оценки соответствия. 2012. № 9. С. 20-24.
2. ГОСТ Р 50779.23-2005. Статистические методы. Статистическое представление данных. Сравнение двух средних в парных наблюдениях.
3. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. М.: Изд-во стандартов, 1985. 256 с.

Белов Дмитрий Борисович, канд. техн. наук, доц., imsbelov@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Соловьев Сергей Игоревич, канд. техн. наук, доц., sergei59bk.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DETERMINATION OF THE IMPORTANCE OF DISTINCTIONS IN RESULTS OF SUPERVISION OF VOLUMES OF THE CONSUMED AND PUT RESOURCE STATISTICAL METHODS

D.B. Belov, S.I. Solovyev

The technique of determination of the importance of distinctions in results of supervision of volumes of the consumed and put resource with use of statistical methods is considered.

Key words: volumes of the consumed and put resource, imbalance of volumes of a resource, distinction of results, statistical methods.

Belov Dmitry Borisovich, candidate of technical science, docent, imsbelov@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Solovyev Sergei Igorevich, candidate of technical science, docent, sergei59bk.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 531.733

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ ЗНАКОВ И ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАСХОЖДЕНИЙ В РЕЗУЛЬТАТАХ УЧЕТА КОЛИЧЕСТВА ПОТРЕБЛЕННОГО И ПОСТАВЛЕННОГО РЕСУРСА

Д.Б. Белов

Рассмотрено использование непараметрического критерия знаков и временных рядов для оценки расхождений в результатах учета потребленного и поставленного ресурса.

Ключевые слова: объемы потребленного и поставленного ресурса, результаты учета, непараметрический критерий знаков, временные ряды.

Достаточно часто организации, поставляющие и реализующие какие-либо энергетические ресурсы (электрическую энергию, природный газ, воду и т.п.) населению сталкиваются с тем, что количество (объемы) отпущенного (поставленного) и оплаченного (потребленного) ресурса за определенные учетные периоды времени не соответствуют между собой. Такое несоответствие называют разбалансом ресурса, который определяется как арифметическая разность между количеством потребленного $V_{потр}$ и поставленного $V_{пост}$ ресурса. Нетрудно заметить, что существенность и значимость разбаланса является следствием существенности и значимости расхождений зафиксированных результатов учета $V_{потр}$ и $V_{пост}$.

Следовательно, чрезвычайно важной задачей при анализе существенности разбаланса ресурса является проверка гипотезы о том, что в результатах учета отдельных пар значений $V_{потр i}$ и $V_{пост i}$ нет значимых различий.

Этому предположению будет соответствовать симметричность распределения вероятности разностей (разбалансов $V_{разб i}$) результатов учета $V_{потр i}$ и $V_{пост i}$ относительно центра, которым должно являться значение, равное нулю. Центру закона распределения разностей присваивается нулевое значение, поскольку при совпадении результатов учета указанных объемов разбалансы должны быть равны именно нулю ($V_{разб i} = V_{потр i} - V_{пост i} = 0$). В реальной ситуации отличие разбалансов от нулевого значения может объясняться только действием каких-либо случайных факторов (например, погрешностями приборов учета объемов поставщика и потребителей) и ничем иным. Симметричность распределения разностей $V_{разб i}$ относительно нуля будет свидетельствовать о том, что распределения вероятностей значений объемов потребленного и по-

ставленного ресурса подчиняются одному и тому же закону и, что отклонения положительного и отрицательного знаков равновероятны.

Для проверки выдвигаемой гипотезы можно использовать непараметрический критерий знаков. Данный критерий получил широкое распространение в исследовательских работах, поскольку процедура его применения исключительно проста и не требует большого объема вычислений. Кроме того, его преимуществом, как и любого другого непараметрического критерия, является то, что при его применении не обязательно знать вид законов распределения вероятности исследуемых величин (в нашем случае значений объемов $V_{номр}$ и $V_{номт}$) [1].

При использовании критерия знаков отдельные пары значений объемов $V_{номр i}$ и $V_{номт i}$ сравниваются между собой по величине и паре присваивается знак «+», если разность $V_{разб i} = V_{номр i} - V_{номт i}$ положительна (т.е. $V_{номр i} > V_{номт i}$), и знак «-», если разность $V_{разб i} = V_{номр i} - V_{номт i}$ отрицательна (т.е. $V_{номр i} < V_{номт i}$).

В случае, если $V_{номр i} = V_{номт i}$, то такие пары при дальнейших расчетах не учитываются, т.е. им присваивается «0».

Далее подсчитываются число положительных пар $K(+)$ (которым присвоен знак «+») и число отрицательных пар $K(-)$ (которым присвоен знак «-»).

Гипотеза о случайном различии значений объемов $V_{номр}$ и $V_{номт}$ отвергается, если минимальное из значений $K(+)$ или $K(-)$ меньше критического значения $K(\alpha)$ (α — уровень значимости), которые выбирается таблице критических значения критерия знаков [1], т.е.:

$$\min(K(+), K(-)) < K(\alpha). \quad (1)$$

Однако, у данного критерия имеется и недостаток — он обладает невысокой мощностью. Поэтому его рекомендуется использовать при достаточно большом числе пар наблюдений [1]. Мощностью критерия называется вероятность отклонения выдвинутой гипотезы, когда данная гипотеза неверна.

Следует отметить, что если все разности пар наблюдений объемов $V_{номр i}$ и $V_{номт i}$ имеют один и тот же знак, т.е. положительны или отрицательны, то естественно, что применение критерия знаков в этом случае не имеет никакого смысла.

Кроме того, при анализе применения критерия знаков просматриваются некоторые противоречия, особенно заметные при графическом представлении последовательности разностей за определенный промежуток времени, с помощью которого также можно установить тенденцию поведения разностей, что также будет свидетельствовать и о тенденции пове-

дения значений объемов $V_{номр}$ и $V_{номт}$ друг относительно друга. Такое графическое представление является ничем иным, как временным рядом, который, как известно, используется для наглядного представления хода изменения наблюдаемых данных [2].

Например, на рис. 1а показан график последовательности разностей (разбалансов), наблюдаемых за учетный период, которым является месяц. Из графика видно, что первые пятнадцать значений имеют положительный знак, а затем происходит резкий скачок вниз и уже остальные пятнадцать значений имеют отрицательный знак. Очевидно, что с помощью критерия знаков будет установлена практически идеальная симметричность распределения разностей относительно нуля. Однако в данном случае налицо проявление какого-то неслучайного фактора, вследствие которого объемы поставки стали заметно превышать объемы потребления. Это может быть, например, нелегальный отбор либо технологические потери из сетей ресурсораспределения.

На рис. 1б показан противоположный случай, когда первые пятнадцать значений разностей (разбалансов) имеют отрицательный знак, а затем происходит резкий скачок вверх и уже остальные пятнадцать значений имеют положительный знак. С помощью критерия знаков также будет установлена практически идеальная симметричность распределения разностей относительно нуля. Однако здесь возможна обратная ситуация, когда, например, нелегальный отбор ресурса из сетей прекратился, либо устранены причины, приводящие к технологическим потерям.

Очевидно, что и в первом и во втором случаях наблюдаются неслучайные тенденции в поведении значений объемов $V_{номр i}$ и $V_{номт i}$ друг относительно друга, т.е. когда их разности резко меняют свой знак и нет случайного чередования с положительной на отрицательную разность и наоборот.

В случае, если на формирование значений объемов $V_{номр i}$ и $V_{номт i}$ оказывают влияние только случайные погрешности, никаких тенденций в поведении результатов наблюдений исследуемых объемов быть не должно. При этом разности (разбалансы) чередуют свой знак совершенно случайным образом, как это показано, например, на рис. 1в.

Следует отметить, что построение графика последовательности значений разбалансов относительно нулевой линии в виде временного ряда является одним из наиболее действенных способов обнаружения неслучайных тенденций поведения значений объемов $V_{номр}$ и $V_{номт}$ друг относительно друга. Это может послужить сигналом к принятию мер по выявлению и устранению причин, приводящих к неслучайному появлению разбаланса в процессе поставки-потребления ресурса. Поэтому перед проверкой выдвинутой гипотезы с помощью критерия знаков целесообразно про-

вести графический анализ, который позволяет наглядно проследить тенденцию поведения разбалансов. Результат проверки гипотезы будет корректным, если на графике значения разбалансов ведут себя случайным образом, несистемно чередуя свой знак.

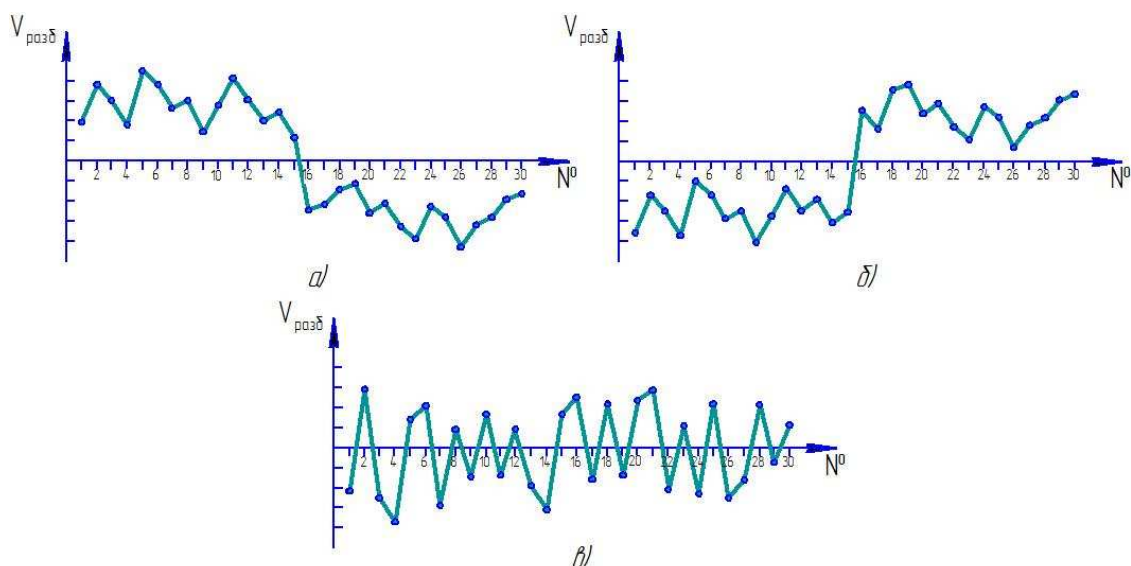


Рис. 1. Временные ряды поведения разбалансов ресурса

Для большей наглядности приведем данные по результатам ежедневного учета объемов потребленного и поставленного природного газа в одном из районов РФ за месяц (таблица).

**Результаты ежедневного учета объемов потребленного
и поставленного газа (в м³)**

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{потр\ i}$	5026	5016	4972	5005	5005	5057	5064	5036	5026	4992
$V_{пост\ i}$	5016	5050	4948	5019	5016	5016	5040	5076	5070	4943
$V_{p\ i}$	10	-34	24	-14	-11	41	24	-40	-44	49
№ п/п	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$V_{потр\ i}$	5033	4948	5044	4957	4981	4944	5078	4986	4991	4995
$V_{пост\ i}$	4991	4964	5026	4977	4970	4992	5068	5014	4969	4965
$V_{p\ i}$	42	-16	18	-20	11	-48	10	-28	22	30
№ п/п	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$V_{потр\ i}$	4966	5026	4979	5035	5075	5039	4959	4998	4937	5023
$V_{пост\ i}$	4999	5004	4945	5056	5030	5060	4995	4966	4917	5002
$V_{p\ i}$	-33	22	34	-21	45	-21	-36	32	20	21

По данным таблицы построим временной ряд поведения разбалансов (рис. 2).

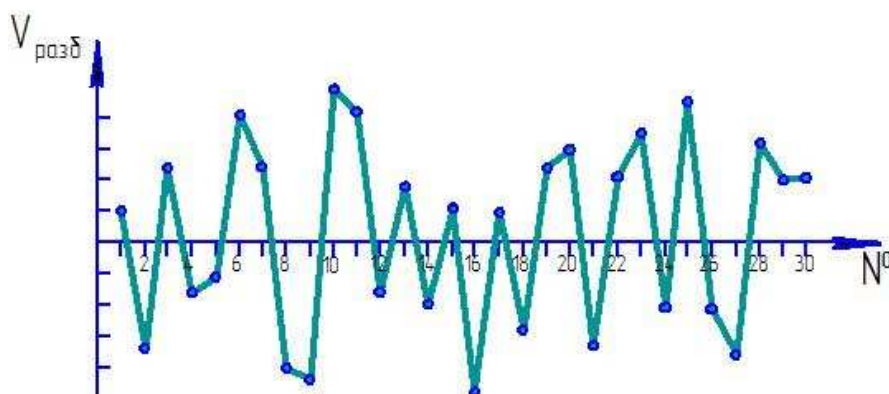


Рис. 2. Временной ряд поведения разбалансов газа, построенный по данным таблицы

Из рис. 2 можно увидеть, что значения разбалансов на графике ведут себя случайным образом, несистемно и хаотично чередуя свой знак. Это свидетельствует о том, что никаких явных тенденций в поведении значений объемов потребленного и поставленного газа друг относительно друга не обнаруживается.

Теперь необходимо подтвердить выводы, полученные с помощью временного ряда проверив гипотезу о том, что в результатах учета отдельных пар значений $V_{\text{потр } i}$ и $V_{\text{пост } i}$ нет значимых различий с помощью критерия знаков. По данным таблицы нетрудно заметить, что отрицательных значений разбалансов меньше, чем положительных ($K(-) = 13 < K(+) = 17$). Определим критическое значение критерия знаков $K(\alpha)$ с уровнем значимости $\alpha = 0,05$: $K(0,05) = 9$ [1]. Неравенство (1) не выполняется, т.к. $K(-) = 13 > K(0,05) = 9$. Это говорит о том, что гипотеза о наличии значимых расхождений в результатах учета отдельных пар значений $V_{\text{потр } i}$ и $V_{\text{пост } i}$ за анализируемый период времени отвергается с уровнем значимости $\alpha = 0,05$.

Следует отметить, что методика оценки расхождений в результатах ежедневного учета объемов потребленного и поставленного ресурса с помощью непараметрического критерия знаков и временных рядов достаточно проста и информативна и ее применение будет полезно для быстрой проверки устойчивости процесса «поставки-потребления» любого ресурса.

Список литературы

1. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М.: Физ-

матлит, 2006. 816 с.

2. Пономарев С.В. Управление качеством продукции. Инструменты и методы менеджмента качества: учебное пособие для вузов / С.В. Пономарев [и др.]. М.: РИА «Стандарты и качество». 2005. 248с.

Белов Дмитрий Борисович, канд. техн. наук, доц., imsbelov@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

*USE OF NONPARAMETRIC CRITERION OF SIGNS AND TEMPORARY RANKS FOR
THE ASSESSMENT OF DIVERGENCES IN RESULTS OF THE ACCOUNTING
OF QUANTITY OF THE CONSUMED AND PUT RESOURCE*

D.B. Belov

We consider the use of non-parametric sign test and time series to assess the variations in the results of metering and supplied resource

Key words: volumes of the consumed and put resource, results of the account, non-parametric criterion of signs, temporary ranks

Belov Dmitry Borisovich, candidate of technical science, docent, imsbelov@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.9.047: 004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРОВОЛОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ-ИНСТРУМЕНТОМ

В.М. Волгин, До Ван Донг, А.Д. Давыдов

Проведено теоретическое исследование электрохимического формообразования проволочным электродом-инструментом. В качестве математической модели процесса использовано уравнение Лапласа для потенциала электрического поля и уравнение эволюции обрабатываемой поверхности. Разработана схема компьютерного моделирования процесса обработки, предусматривающая: численное решение методом граничных элементов граничного интегрального уравнения, являющегося следствием уравнения Лапласа; определение нового положения обрабатываемой поверхности с учетом возможных топологических изменений; перемещение проволочного электрода-инструмента по заданной траектории. Проведен анализ различных схем формообразования типовых элементов, предложены способы повышения точности обработки.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, проволочный электрод-инструмент, моделирование, эволюция обрабатываемой поверхности.

Для разрезания и вырезания деталей сложной формы, которые изготовлены из труднообрабатываемых материалов широко используются различные методы электрофизикохимической обработки, такие как лазерная, электроэрозионная и электрохимическая обработка. При использовании лазерного и электроэрозионного вырезания на обрабатываемой поверхности формируется зона термического влияния, которая отсутствует при электрохимической обработке (ЭХО) проволочным электродом-инструментом (ПЭИ). Хотя схемы электрохимического вырезания известны уже достаточно давно [1 - 5], недостаточно высокая точность обработки не позволили получить им широкого применения. Однако в последние годы интерес к электрохимическому вырезанию постоянно повышается, особенно при обработке микродеталей [6 - 11]. Это обусловлено целым рядом причин, среди которых можно выделить следующие: отсутствие значительного механического воздействия на ПЭИ и заготовку, что позволяет производить обработку маложесткий деталей с высокой точностью; отсутствие термического воздействия на заготовку и инструмент; отсутствие износа ПЭИ; использование импульсов технологического напряжения сверхкороткой длительности (порядка нескольких наносекунд) и сверхма-

лых межэлектродных зазоров (порядка нескольких микрометров) и т.д.

Закономерности электрохимического формообразования при получении элементов сложной формы в настоящее время изучены недостаточно, так как большинство работ, посвященных исследованию процесса ЭХО ПЭИ, являются экспериментальными. Для определения геометрии реза при перемещении ПЭИ по прямолинейной траектории с постоянной скоростью можно использовать известные аналитические решения [12], а в более сложных случаях необходимо использовать численные методы, такие как - метод конечных разностей, метод конечных элементов и метод граничных элементов [13 – 16].

Целью настоящей работы является разработка методов численного моделирования ЭХО подвижным ПЭИ с учетом возможных топологических изменений поверхности обрабатываемой заготовки и исследование различных схем формирования типовых элементов (отверстий и пазов различной формы).

Для моделирования процесса ЭХО ПЭИ (рис. 1) будем использовать модель идеального формообразования, не учитывающую концентрационные изменения в растворе [13]. Использование такого приближения допустимо при достаточно интенсивной прокачке или перемешивании раствора электролита. Для расчета распределения электрического потенциала в межэлектродном пространстве, будем использовать уравнение Лапласа:

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad} \varphi) = 0, \quad (1)$$

где φ - потенциал электрического поля.

Плотность тока может быть рассчитана с использованием закона Ома:

$$\mathbf{i} = -\chi \operatorname{grad} \varphi, \quad (2)$$

где $\mathbf{i}$ - плотность тока, χ - удельная электропроводность электролита.

Граничные условия на участках границы, расположенных на изоляторе или совпадающих с линиями симметрии задаются в виде

$$\varphi' = 0, \quad (3)$$

что соответствует непротеканию электрического тока через границу.

Граничные условия на участках границы, расположенных на электродах, учитывают процессы переноса в диффузионном слое и электродные процессы и задаются следующим образом:

$$\varphi = \begin{cases} U - E_p - \eta(\chi\varphi'), & \text{на аноде} \\ -E_p - \eta(\chi\varphi'), & \text{на катоде} \end{cases} \quad (4)$$

где U – напряжение, приложенное к электродам, E_p - равновесный потенциал электрода, $\eta = \eta_e + \eta_d$ - перенапряжение электрода, представляющее собой сумму η_e и η_d электрохимического и диффузионного перенапряжений, соответственно.

Перемещение обрабатываемой поверхности, обусловленное анод-

ным растворением металла, будем описывать следующим соотношением:

$$\frac{d\Gamma}{dt} = \frac{\eta\varepsilon}{\gamma} \dot{\mathbf{i}} = -\frac{\eta\varepsilon\chi}{\gamma} \frac{\partial\phi}{\partial n} \mathbf{n}, \quad (5)$$

где $\Gamma = [x_a(l, t) \ y_a(l, t)]$ – вектор-функция, задающая обрабатываемую поверхность; $x_a(l, t), y_a(l, t)$ – координаты точки на обрабатываемой поверхности; l – натуральный параметр обрабатываемой поверхности; t – время; η – выход по току; ε – электрохимический эквивалент материала заготовки; γ – плотность материала заготовки; $\mathbf{n}$ – единичный вектор внешней нормали к поверхности обрабатываемой заготовки.

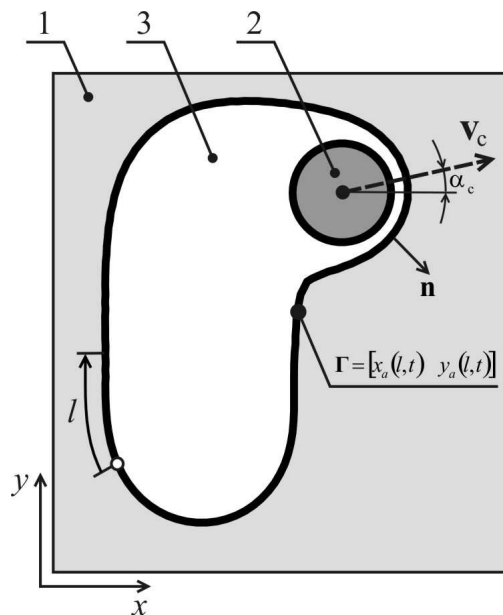


Рис. 1. Схема электрохимического формообразования ПЭИ:
1 – обрабатываемая заготовка; 2 – ПЭИ; 3 – межэлектродное пространство, заполненное раствором электролита

Перемещение проволочного электрода-инструмента в процессе обработки можно характеризовать положением его центра $[x_c(t), y_c(t)]$, которое связано со скоростью и направлением перемещения инструмента следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dx_c}{dt} &= v_c(t) \cos[\alpha_c(t)] \\ \frac{dy_c}{dt} &= v_c(t) \sin[\alpha_c(t)] \end{aligned} \quad (6)$$

где $v_c(t)$ – скорость перемещения (подача) электрода-инструмента; $\alpha_c(t)$ – угол между направлением подачи электрода-инструмента и осью абсцисс.

Для удобства решения и анализа полученных результатов математическая модель была приведена к безразмерному виду. При этом в каче-

стве единицы длины был выбран диаметр ПЭИ ($d_{\text{ПЭИ}}$), в качестве единицы электрического потенциала – значение технологического напряжения (U), а в качестве единицы скорости – характерное значение скорости перемещения ПЭИ (v_0):

$$X = \frac{x}{d_{\text{ПЭИ}}}, Y = \frac{y}{d_{\text{ПЭИ}}}, \Phi = \frac{\varphi}{U}, I = \frac{d_{\text{ПЭИ}}}{\chi U} i, V_c = \frac{v_c}{v_0}, \tau = \frac{v_0}{d_{\text{ПЭИ}}} t, \quad (7)$$

где X, Y – безразмерные координаты; Φ – безразмерный потенциал; I – безразмерная плотность тока; τ – безразмерное время; V_c – безразмерная скорость перемещения ПЭИ.

Полученная система безразмерных уравнений имеет следующий вид:

$$\text{div}(\text{grad } \Phi) = 0. \quad (8)$$

$$\frac{dX_a}{d\tau} = A \frac{\partial \Phi}{\partial X}, \quad \frac{dY_a}{d\tau} = A \frac{\partial \Phi}{\partial Y}. \quad (9)$$

$$\frac{dX_c}{d\tau} = V_c(\tau) \cos[\alpha_c(\tau)], \quad (10)$$

$$\frac{dY_c}{d\tau} = V_c(\tau) \sin[\alpha_c(\tau)].$$

В соотношения (9) входит безразмерный параметр A , характеризующий условия проведения процесса обработки. Значение этого параметра рассчитывается с использованием следующего соотношения:

$$A = \frac{\eta \epsilon \chi U}{\gamma d_{\text{ПЭИ}} v_0}. \quad (11)$$

Для решения системы уравнений (8) – (10) должны быть заданы граничные и начальные условия. Для рассматриваемой схемы ЭХО (рис. 1) в случае когда поляризацией электродов можно пренебречь, граничные условия для безразмерного потенциала будут иметь следующий вид:

$$\Phi = \begin{cases} 1, & \text{на аноде} \\ 0, & \text{на катоде} \end{cases} \quad (12)$$

Начальные условия зададим, принимая, что в начальный момент времени центр ПЭИ располагается в начале координат, а обрабатываемая поверхность эквидистантна поверхности ПЭИ и отстоит от нее на величину начального безразмерного межэлектродного зазора S_0 . С учетом этого начальные условия будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} X_c(0) &= Y_c(0) = 0, \\ X_a(L, 0) &= (0.5 + S_0) \cos\left(\frac{L}{0.5 + S_0} - \pi\right), \\ Y_a(L, 0) &= (0.5 + S_0) \sin\left(\frac{L}{0.5 + S_0} - \pi\right), \end{aligned} \quad (13)$$

где L – безразмерный натуральный параметр, принимающий значения от 0 до $\pi(0.5 + S_0)$.

По аналогии ЭХО плоским электродом-инструментом, который перемещается к обрабатываемой заготовке с постоянной скоростью, в рассматриваемом случае можно ввести понятие установившегося межэлектродного зазора $S_y = \frac{s_y}{d_{ПЭИ}}$:

$$S_y = \frac{A}{K_{ПЭИ}}, \quad (14)$$

где $K_{ПЭИ} = \frac{\eta \epsilon \chi U}{\gamma d_{ПЭИ}^{\nu_0} S_y}$ – коэффициент, значение которого монотонно приближается к единице при уменьшении величины установившегося межэлектродного зазора.

В первом приближении можно принять, что $A = S_y$, и проводить расчеты задавая различные значения S_y . При необходимости перехода к размерным переменным, отличие значения коэффициента $K_{ПЭИ}$ от единицы может быть учтено на основании сравнения заданного и полученного в результате численного решения установившихся значений торцевого межэлектродного зазора. В результате введения установившегося безразмерного торцевого межэлектродного зазора соотношения (9) можно записать в следующем виде:

$$\frac{dX_a}{d\tau} = S_y \frac{\partial \Phi}{\partial X}, \quad \frac{dY_a}{d\tau} = S_y \frac{\partial \Phi}{\partial Y}. \quad (15)$$

Краевая задача для уравнений (8), (10) и (15) относится к классу задач с подвижной границей. При этом требуется совместное решение уравнений, описывающих процессы переноса и движение границы расчетной области, что связано с большими сложностями. Для упрощения численного решения часто используют квазистационарное приближение. В рамках этого приближения все время обработки разбивается на некоторое количество шагов. Для каждого шага по времени:

1) в начале рассчитывается распределение электрического поля (при геометрии электродов, соответствующих началу шага:

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad} \Phi^n) = 0, \quad (16)$$

$$\Phi|_{[X=X_a^n, Y=Y_a^n]} = 1, \Phi|_{(X-X_c^n)^2 + (Y-Y_c^n)^2 = 0.25} = 0, \quad (17)$$

2) затем определяется новая форма обрабатываемой поверхности (при распределении плотности тока, соответствующей началу шага):

$$X_a^{n+1} = X_a^n + \Delta\tau S_y \frac{\partial \Phi^n}{\partial X}, \quad Y_a^{n+1} = Y_a^n + \Delta\tau S_y \frac{\partial \Phi^n}{\partial Y}, \quad (18)$$

3) далее определяется новое положение центра ПЭИ:

$$\begin{aligned} X_c^{n+1} &= X_c^n + \Delta\tau V_c(\tau^n) \cos[\alpha_c(\tau^n)], \\ Y_c^{n+1} &= Y_c^n + \Delta\tau V_c(\tau^n) \sin[\alpha_c(\tau^n)]. \end{aligned} \quad (19)$$

В соотношениях (17) – (19) верхний индекс n обозначает номер шага по времени, а $\Delta\tau$ - обозначает величину шага по времени.

На каждом шаге по времени численное решение краевой задачи для уравнения (16) с граничными условиями (17) может быть осуществлено методом конечных элементов или методом граничных элементов. В последнем случае краевая задача сводится к граничному интегральному уравнению.

Метод расчета распределения потенциала электрического поля. Уравнение Лапласа (16) с граничными условиями первого рода (17) при постоянных параметрах межэлектродной среды на основе тождества Грина сводится к граничному интегральному уравнению:

$$c(\zeta)\Phi(\zeta) = -\oint_{\Gamma} F(\zeta, \xi)\Phi(\xi)d\Gamma + \oint_{\Gamma} G(\zeta, \xi)\frac{\partial\Phi(\xi)}{\partial\mathbf{n}}d\Gamma, \quad \forall \zeta \in \Gamma, \quad \forall \xi \in \Gamma, \quad (20)$$

где $\zeta = (X, Y)$ - точка наблюдения, $\xi = (X', Y')$ - точка расположения источника, $G(\zeta, \xi)$ - фундаментальное решение уравнения Лапласа (функция Грина), $F(\zeta, \xi) = \frac{\partial G(\zeta, \xi)}{\partial\mathbf{n}}$ - производная от фундаментального решения в направлении внешней нормали к границе $\Gamma = \partial\Omega$, $c(\zeta)$ - коэффициент, зависящий от способа аппроксимации потенциала на границе.

Для решения интегрального уравнения (21) будем использовать метод граничных элементов. Для упрощения расчетов будем использовать постоянные граничные элементы, в которых потенциал и напряженность электрического поля имеют постоянные значения.

Для постоянных граничных элементов значение коэффициента $c(\zeta)$ равно одной второй. Фундаментальное решение уравнения Лапласа и его нормальная производная в двумерном случае имеет вид:

$$G(\zeta, \xi) = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{1}{r(\zeta, \xi)}, \quad F(\zeta, \xi) = -\frac{1}{2\pi r} \frac{\partial r}{\partial\mathbf{n}} \quad (21)$$

где $r(\zeta, \xi) = |\zeta - \xi| = \sqrt{\sum_{i=1}^2 (\zeta_i - \xi_i)^2}$ - расстояние между точками ζ и ξ .

Разобьем границу Γ на N прямолинейных граничных элементов. Расчетные точки (узлы) расположим в середине граничного элемента. Дискретная форма уравнения (20) будет иметь вид

$$\frac{1}{2}\Phi_k = \sum_{m=1}^N F_{km}\Phi_m + \sum_{m=1}^N G_{km}\Phi'_m \quad (22)$$

$$\text{где } G_{km} = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma_m} \ln \frac{1}{r(\zeta_k, \xi)} d\Gamma, \quad F_{km} = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma_m} \frac{1}{r(\zeta_k, \xi)} \frac{\partial r}{\partial \mathbf{n}} d\Gamma.$$

Значения коэффициентов F_{km} и G_{km} можно вычислить аналитически с использованием следующих соотношений:

$$G_{km} = \frac{-1}{2\pi} \begin{cases} r_{km}^e \sin \theta_{km}^e (\ln r_{km}^e - 1) - r_{km}^b \sin \theta_{km}^b (\ln r_{km}^b - 1) + h_{km} (\theta_{km}^e - \theta_{km}^b), & k \neq m \\ l_m \left(\ln \frac{l_m}{2} - 1 \right), & k = m \end{cases} \quad (23)$$

$$F_{km} = \frac{1}{2\pi} \begin{cases} \theta_{km}^b - \theta_{km}^e, & k \neq m \\ 0, & k = m \end{cases} \quad (24)$$

где l_m - длина m -го граничного элемента; r_{km}^b, r_{km}^e - расстояния между серединой k -го граничного элемента и начальной и конечной точкой m -го граничного элемента, соответственно; $\theta_{km}^b, \theta_{km}^e$ - углы между отрезками, соединяющими середину k -го граничного элемента с начальной и конечной точкой m -го граничного элемента, соответственно и внешней нормалью к m -му граничному элементу при границы таким образом, что область Ω всегда находится слева.

Подставляя в систему уравнений (22) граничные условия (17) получим совместную систему линейных уравнений для расчета потенциала электрического поля в межэлектродном пространстве:

$$\overline{\mathbf{A}} \mathbf{z} = \mathbf{f}, \quad (25)$$

где $\overline{\mathbf{A}}$ - квадратная матрица $N \times N$, $\mathbf{z}$ - вектор неизвестных узловых значений, $\mathbf{f}$ - вектор свободных членов.

В результате решения системы уравнений (25) определяется распределение плотности тока (производной электрического потенциала в направлении нормали к границе расчетной области) по поверхности обрабатываемой заготовки, которое используется для решения уравнения (18) и определения геометрии обрабатываемой поверхности для очередного шага по времени.

Результаты моделирования и обсуждение. При моделировании были приняты следующие значения параметров: безразмерный установившийся межэлектродный зазор принимался равным от 0.05 до 0.5, величина шага по безразмерному времени выбиралась из условия обеспечения устойчивости и точности численного решения и составляла, как правило, от 0.002 до 0.02. На исходных поверхностях заготовки и ПЭИ задавалось от 20 до 100 линейных граничных элементов. В процессе моделирования расстояние между узлами сетки граничных элементов изменялось – увеличивалось на выпуклых участках обрабатываемой поверхности и уменьшалось на вогнутых участках. Для обеспечения удовлетворительной точности

численного решения и сокращения объема вычислений в процессе моделирования осуществлялась адаптация сетки граничных элементов. При этом был использован достаточно простой метод, обладающий при этом достаточно высокой эффективностью. Суть этого метода заключается в следующем: при увеличении длины граничного элемента более чем в 1.5 по сравнению с его начальной длиной, элемента разбивался на два элемента одинаковой длины; при уменьшении длины граничного элемента более чем в 2 раза по сравнению с его начальной длиной, элемент исключался, при этом два соседних граничных элемента заменялись одним.

На первом этапе было проведено моделирование ЭХО при прямолинейном перемещении ПЭИ с постоянной скоростью (рис. 2). В результате расчетов были определены значения ширины реза, бокового межэлектродного зазора и торцевого межэлектродного зазора (табл. 1). Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с известными литературными данными [12]. В частности, величина торцевого зазора приблизительно на 10 % меньше, соответствующего значения для плоского электрода.

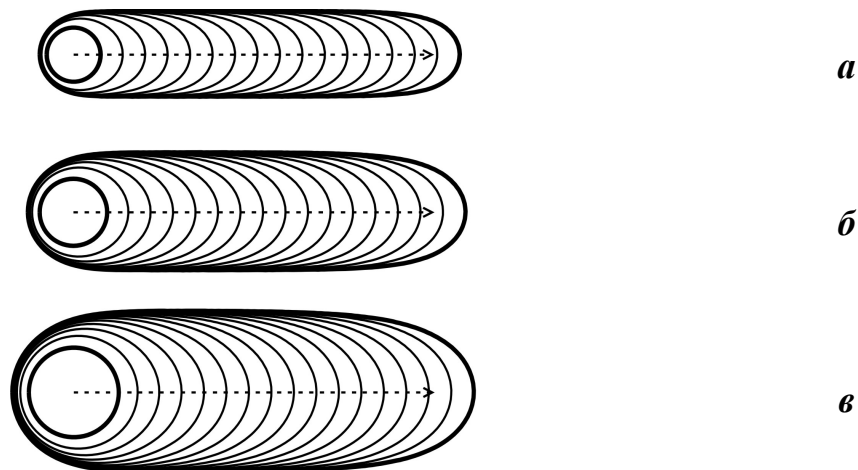


Рис. 2. Результаты моделирования ЭХО при прямолинейном перемещении ПЭИ и различном значении установившегося зазора: а – $S_y = 0.1$, б – $S_y = 0.25$, в – $S_y = 0.5$; горизонтальное перемещение ПЭИ равно 8, скорость перемещения ПЭИ равна 1. Утолщенные линии обозначают исходное (круглое) отверстие и полученный после обработки паз. Пунктирной линией обозначена траектория перемещения ПЭИ

Затем было проведено моделирование обработки угловых участков контура (рис. 3) при двух значениях установившегося межэлектродного зазора ($S_y = 0.1, 0.5$). Из полученных результатов следует, что длина переходной зоны, в которой геометрия реза отличается от геометрии реза при прямолинейном перемещении ПЭИ, зависит от величины установившегося

межэлектродного зазора. При увеличении этого зазора размер переходной зоны увеличивается, а ширина реза в конце первого участка траектории перемещения электрода-инструмента увеличивается (рис. 3г – 3е). Причем, погрешность возрастает при увеличении угла между двумя участками траектории перемещения ПЭИ (рис. 3е).

Таблица 1

Параметры полученного реза при прямолинейном перемещении ПЭИ

S_y	Ширина реза	Боковой зазор	Торцевой зазор
0.1	1.94	0.47	0.089
0.25	2.68	0.84	0.22
0.5	3.62	1.31	0.455

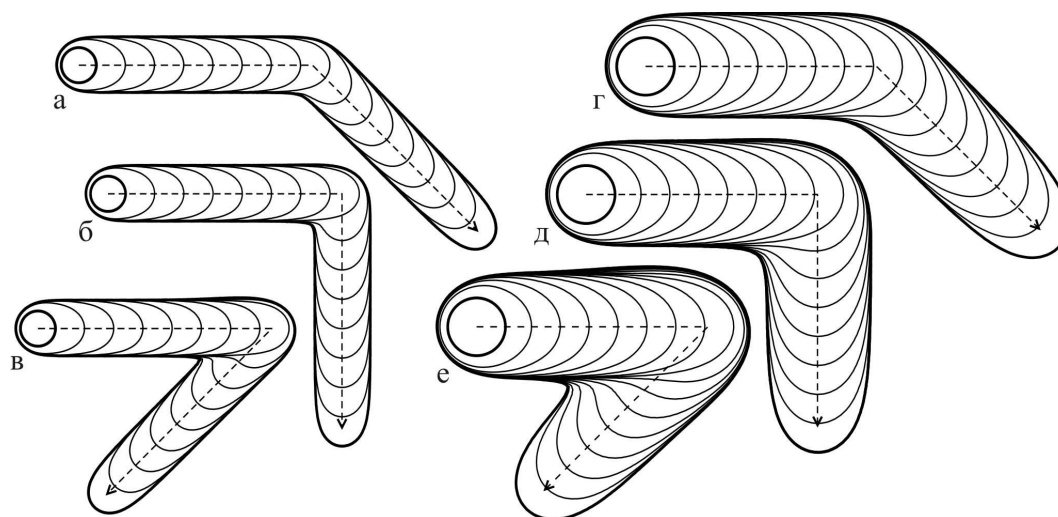


Рис. 3. Результаты моделирования ЭХО углов при установившихся зазорах: а, б, в - $S_y = 0.1$; г, д, е - $S_y = 0.5$: а, г – угол 45° , б, д – угол 90° , в, е – угол 135° ; перемещение ПЭИ на горизонтальном и наклонном участке равно 8, скорость перемещения ПЭИ равна 1.

Утолщенные линии обозначают исходное (круглое) отверстие и полученный после обработки паз. Пунктирной линией обозначена траектория перемещения ПЭИ

Затем было изучено влияние условия проведения процесса и траектории перемещения ПЭИ на точность обработки отверстий квадратного (рис. 4, 5) и треугольного (рис. 6) сечений.

Были рассмотрены две схемы формообразования. Для первой схемы ПЭИ до обработки располагается в центре отверстия, затем он перемещается по нормали к соответствующему контуру (квадратному или треугольному), после выхода центральной точки ПЭИ на контур, электрод перемещается по контуру по часовой стрелке, а затем возвращается в исходную

точку (рис. 4а, 4в, 6а, 6в). Для второй схемы формообразования ПЭИ до обработки находится в одной из угловых точек контура, по которому он перемещается с постоянной скоростью до возвращения в исходную точку (рис. 4б, 4г, 6б, 6г).

В отличие от формирования прямолинейных пазов и угловых участков при обработке более сложных элементов, таких как отверстия квадратного и треугольного поперечного сечения, могут происходить топологические изменения обрабатываемой поверхности (рис. 5). В рассмотренных случаях обработки отверстий топологические изменения могут происходить в результате того, что в процессе обработки не весь материал заготовки внутри отверстия анодно растворяется. При моделировании было принято, что при отделении части материала, расположенного в центральной части формируемого отверстия, от заготовки (т.е. при самопересечении обрабатываемой поверхности) эта часть материала заготовки удаляется из зоны обработки (рис. 5).

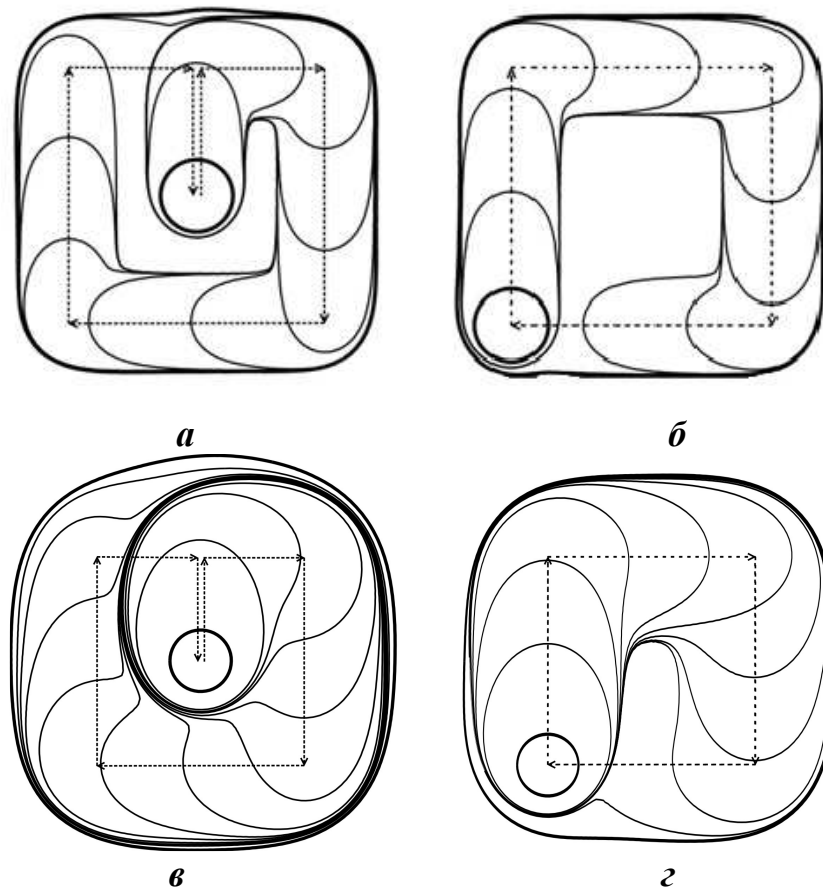


Рис. 4. Результаты моделирования ЭХО квадратного отверстия ПЭИ при установившихся зазорах: а, б - $S_y = 0.1$; в, г - $S_y = 0.5$: для различных схем перемещения электрода-инструмента: а, в – из центра квадрата, б, г – из угла квадрата. Утолщенные линии обозначают исходное (круглое) и полученное после обработки отверстия.

Пунктирной линией обозначена траектория перемещения ПЭИ

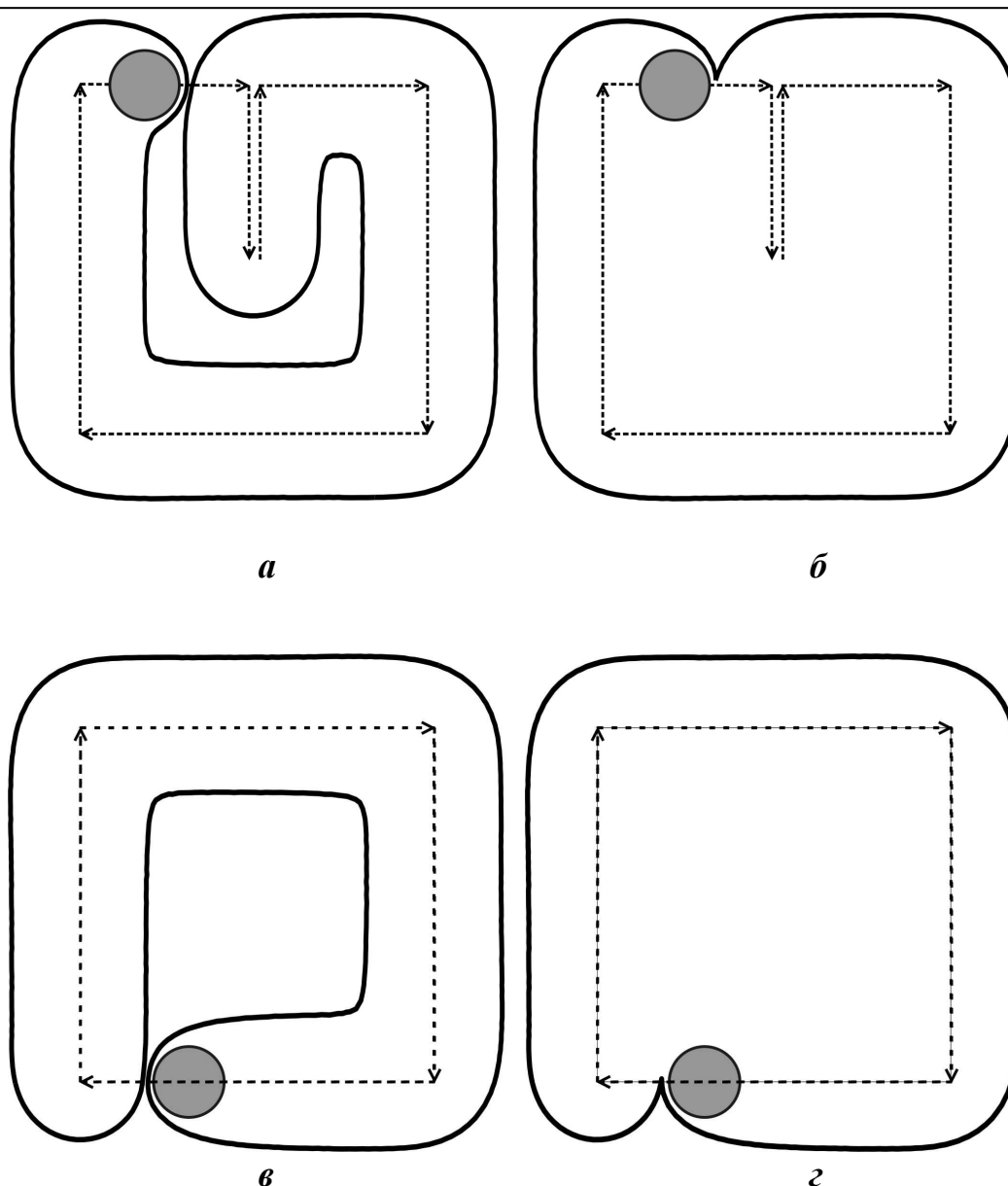


Рис. 5. Геометрия реза до (а, в) и после (б, г) взаимопересечения (топологического изменения) обрабатываемой поверхности для различных траекторий перемещений ПЭИ. Безразмерный межэлектродный зазор равен 0.1

Кроме того, в процессе обработки на обрабатываемой поверхности могут образовываться острые кромки (рис. 5). Такие нарушения гладкости поверхности заготовки при использовании принятого в работе параметрического описания геометрии обрабатываемой поверхности, могут приводить к образованию взаимопересечений, которые не имеют физического смысла и должны устраняться при моделировании. Для анализа и устранения взаимопересечений граничных элементов, описывающих обрабатываемую поверхность, был использован следующий алгоритм:

- для всех возможных пар граничных элементов производился расчет точки пересечения линий, проходящих через граничные элементы;
- определялось расположение точки пересечения и выделялся случай, когда точка пересечения находится внутри каждого из граничных элементов, т.е. имеет место взаимопересечение контура;
- при наличии пересечения контура, формировались три группы граничных элементов (от первого элемента до наименьшего из элементов, соответствующих точке пересечения; элементы, расположенными между элементами, которые пересекаются; элементы, начиная с наибольшего из элементов, соответствующих точке пересечения, до граничного элемента с наибольшим номером);
- определялись группы граничных элементов в действительности, описывающих геометрию обрабатываемой поверхности, остальные группы граничных элементов исключались из дальнейшего расчета.

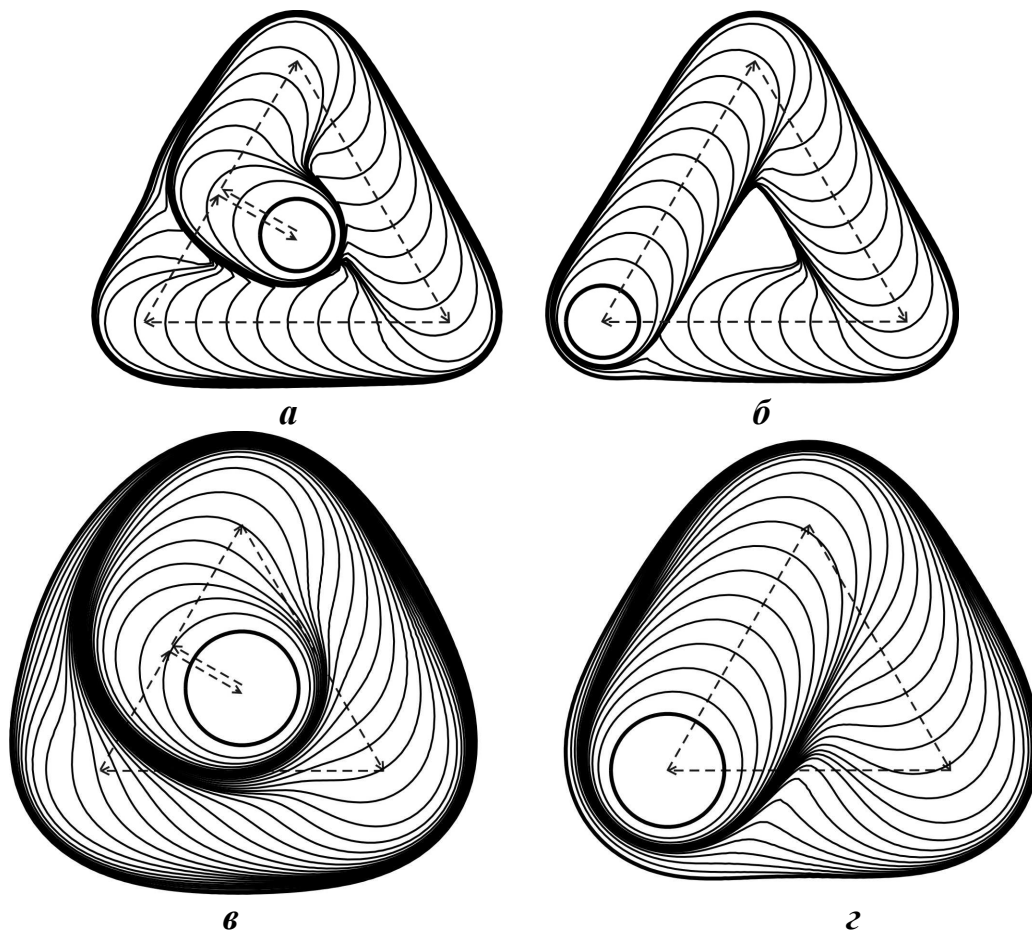


Рис. 6. Результаты моделирования ЭХО треугольного отверстия при безразмерных межэлектродных зазорах: а, б - $S_y = 0.1$; в, г - $S_y = 0.5$ для различных схем перемещения электрода-инструмента: а, в – из центра треугольника, б, г – из вершины треугольника. Утолщенные линии обозначают исходное (круглое) и полученное после обработки отверстия. Пунктирной линией обозначена траектория перемещения ПЭИ

Закключение. В настоящей работе разработана схема численного моделирования электрохимического формообразования проволочным электродом-инструментом, позволяющая прогнозировать размеры и форму обработанной поверхности. Был проведен анализ обработки типовых элементов – прямые и угловые пазы, отверстия квадратного и треугольного поперечного сечения. Показана возможность применения предложенной схемы моделирования для различных схем формообразования, в том числе, и для случаев, когда могут происходить топологические изменения обрабатываемой поверхности. Результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с литературными данными. В дальнейшем планируется расширить возможности моделирования за счет учета зависимости выхода по току от плотности тока, учета поляризации электродов. Кроме того, будет обеспечена возможность реализации импульсных режимов обработки и учета эффектов, связанных с зарядением-разрядением двойного электрического слоя.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 13-08-97562.

Список литературы

1. Metzger M. Electrolytic Saw // Review of Scientific Instruments. 1958. V.29. P. 620-621.
2. Проклова В.Д. Электрохимическая обработка непрофилированным электродом-инструментом. М.: Машиностроение. 1976. 54 с.
3. Chikamori K. Electrochemical wire cutting method. U.S. Patent No. 4052274. 4 Oct. 1977.
4. Itoh T. Method and apparatus for electrically cutting work pieces with a wire electrode. U.S. Patent No. 4317019. 23 Feb. 1982.
5. Bejar M.A., Eterovich F. Wire-electrochemical cutting with a NaNO_3 electrolyte // J. Materials Processing Tech. 1995. V.55 (3-4). P. 417-420.
6. Zhu D., Wang K., Qu N.S. Micro wire electrochemical cutting by using in situ fabricated wire electrode // Annals of the CIRP. 2007. V.56(1). P. 241-244.
7. Shin H.Sh., Kim B.H., Chu Ch.N. Analysis of the side gap resulting from micro electrochemical machining with a tungsten wire and ultrashort voltage pulses // J. Micromech. Microeng. 2008. V.18. 075009.
8. Wang S., Zhu D., Zeng Y., Liu Y. Micro wire electrode electrochemical cutting with low frequency and small amplitude tool vibration // Int. J. Advanced Manufacturing Technology. 2011. V.53 (5-8). P. 535-544
9. Osipenko V.I., Stupak D.O., Trigub O.A., Bilan A.V. Calculation of the parameters of the technological-current density distribution during wire electrode electrochemical processing // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2012. V.48. No.2. P.105–110.

10. Spieser A., Ivanov A. Recent developments and research challenges in electrochemical micromachining (μ ECM) // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2013. V.69. P. 563-581.
11. Schuster R. Electrochemical microstructuring with short voltage pulses // ChemPhysChem. 2007 V.8. P. 34-39.
12. Zhitnikov V.P., Fedorova G.I., Zinatullina O.V., Kamashev A.V. Simulation of non-stationary processes of electrochemical machining // J. Materials Processing Technology. 2004. V.149. P. 398-403.
13. Давыдов А.Д., Волгин В.М., Любимов В.В. Электрохимическая размерная обработка металлов: процесс формообразования // Электрохимия. 2004. Т.40. N 12. С. 1438-1480.
14. Volgin V.M., Davydov A.D. Modeling of multistage electrochemical shaping // Journal of Materials Processing Technology. 2004. V.149. N 1-3. P. 466-471.
15. Pattavanitch J., Hinduja S., Atkinson J. Modelling of the electrochemical machining process by the boundary element method // CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2010. V.59. P. 243-246.
16. Hinduja S. Kunieda M. Modelling of ECM and EDM processes // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2013. V.62. P. 775-797.

Волгин Владимир Мирович, д-р техн. наук, проф., volgin@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

До Ван Донг, аспирант, svaolinh_vn2005@yahoo.com.vn, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Давыдов Алексей Дмитриевич, д-р хим. наук, проф., davydov@elchem.ac.ru, Россия, Москва, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН

SIMULATION OF ELECTROCHEMICAL MACHINING WITH WIRE TOOL-ELECTRODE

V.M. Volgin, Do Van Dong, A.D. Davydov

This paper is devoted to theoretical investigation of electrochemical machining with wire tool-electrode. Mathematical model of the process includes the Laplace equation for the potential of the electric field and the equation for evolution of the surface being treated. A scheme for computer simulation is as follows: numerical solution of boundary integral equation for electric potential by the boundary element method; definition of the new position of the treated surface with taking into account the possible topological changes; moving wire electrode-tool along a predetermined path.

Key words: electrochemical machining, wire tool-electrode, modeling, evolution of workpiece surface.

Volgin Vladimir Mirovich, doctor of technical sciences, professor, volgin@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Do Van Dong, postgraduate, svaolinh_vn2005@yahoo.com.vn, Russia, Tula, Tula State University,

Davydov Alexey Dmitrievich, doctor of chemical sciences, professor, davydov@elchem.ac.ru, Russia, Moscow, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS

УДК 621.9.047.7

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛЬЕФА И СТРУКТУРЫ ТИТАНОВОГО НАНОПОКРЫТИЯ, СФОРМИРОВАННОГО НА ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

М.С. Саломатников

Проведено исследование рельефа и структуры титанового покрытия нанометровой толщины, полученного на поверхности волокнистого материала - ткани «шифон» методом электродугового испарения материала катода с последующей бомбардировкой в условиях низкотемпературной активации аргоновой плазмой. Разработана методика проведения исследований. Произведена оценка геометрических характеристик поверхности металлизированной ткани с помощью атомно-силовой микроскопии.

Ключевые слова: рельеф, структура, нанопокрывтие, текстильные материалы, порошки, частицы, зондовая микроскопия, наношероховатость.

На протяжении всех времен волокнистые материалы, к которым относятся текстильные материалы, были и остаются неотъемлемой частью нашей повседневной жизни. Это и одежда, которую мы носим, и элементы интерьера, бытовое белье, различные обшивки, строительные материалы и др. В качестве одежды волокнистые материалы призваны защищать нас от негативного воздействия окружающей среды (природных и техногенных факторов).

На сегодняшний день некоторые из мировых производителей одежды стремятся придать ей дополнительные функциональные возможности, например теплосберегающие, гидрофобные, износостойкие, антибактериальные свойства и экранирования электромагнитного излучения (ЭМИ) [1]. Одним из возможных методов получения таких свойств у текстильных материалов, является формирование на их поверхности покрытия нано- и микрометровой толщины различных металлов (медь, алюминий, титан, никель, хром и т.д.) [2]. В последнее время наибольшее распространение

для осуществления такой обработки получили вакуумные методы нанесения покрытий, среди которых выделяется магнетронная металлизация и технология электродугового испарения материала катода с последующей бомбардировкой (КИБ) в условиях низкотемпературной активации поверхностей ионами инертного газа, что позволяет формировать покрытия с высокой адгезией к основе.

Для ряда практических применений, например, для создания экраняющих ЭМИ или гидрофобных материалов, рельеф и структура покрытия на поверхности текстильных материалов являются важными показателями, исследование и оценка которых является актуальной задачей.

Цель работы - исследование структуры и геометрических характеристик титанового покрытия нанометровой толщины, полученного на поверхности ткани «шифон» методом КИБ.

Техника и методика исследований. Объектом исследования является волокнистый материал – ткань «шифон» (ГОСТ 20723-2003 «Ткани плательные из натурального крученного шелка. Общие технические характеристики») с титановым покрытием нанометровой толщины, нанесенным методом электродугового распыления материалов катодов (КИБ), с предварительной активацией образцов низкотемпературной аргоновой плазмой, для создания условий формирования металлических пленок с высокой адгезией к основе [3].

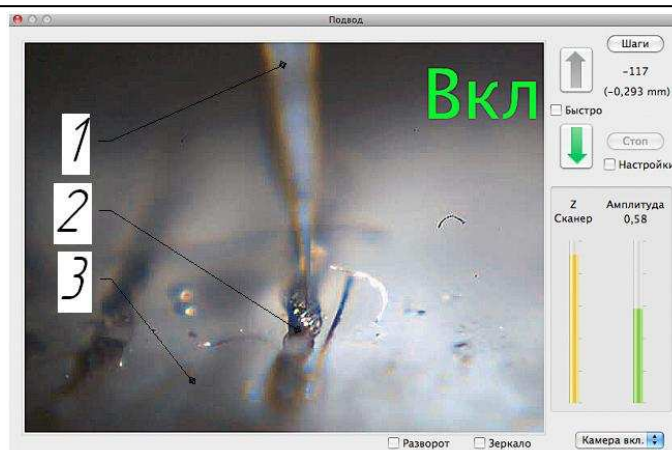
Исследование топографии поверхности металлизированной ткани «шифон» проводили с помощью оптического микроскопа “БМИ-1Ц”, оснащенного устройством цифровой индикации. Оптическую микроскопию проводили на образцах, полученных в работе [2-4].

Оценку параметров наношероховатости поверхности металлизированной ткани осуществляли с использованием сканирующего зондового микроскопа “*Nanoeducator*”, в режиме атомно-силовой микроскопии (АСМ) по разработанной методике.

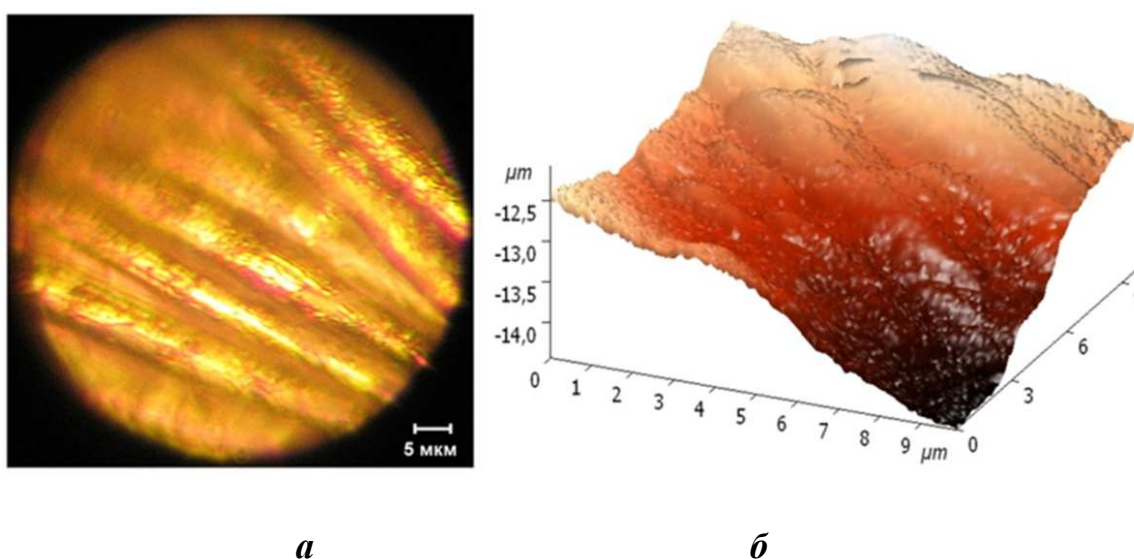
Предварительно нить металлизированной ткани «шифон» диаметром 120...130 мкм закрепляли на плоской поверхности (пластине) с помощью эпоксидной смолы, для придания жесткости конструкции нити. Далее пластину с образцом металлизированной нити устанавливали на предметный столик зондового микроскопа, производили подвод образца к зонду и дальнейшее сканирование поверхности участка ткани размером 10x10 мкм (максимальный размер сканирования 90x90 мкм) (рис. 1).

После сканирования поверхности зондом (кантилевером) проводили анализ результатов измерений и оценку геометрических характеристик поверхности металлизированной ткани «шифон».

С помощью оптической микроскопии было установлено, что волокна ткани «шифон» с титановым покрытием нанометровой толщины имеют развитую структуру поверхности, ввиду наличия имеются многочисленные микрокапель титана диаметром до 1 мкм (рис. 2, а).



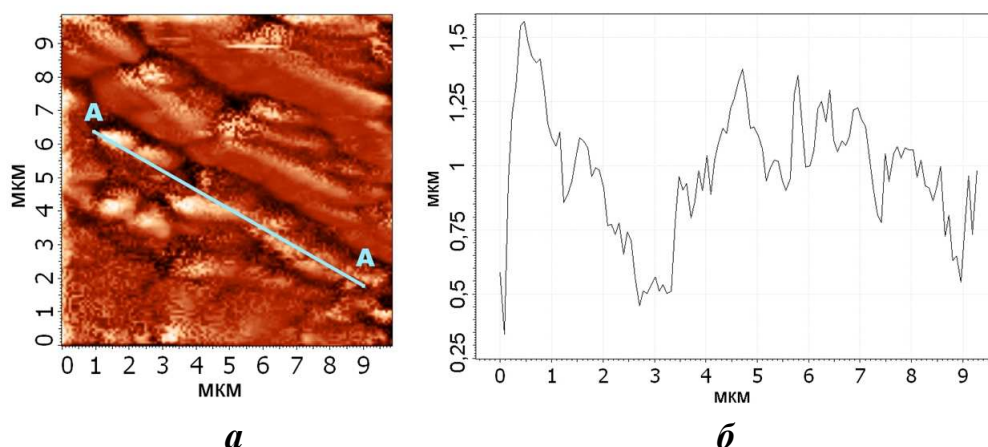
**Рис. 1. Окно подвода зонда к поверхности
металлизированного шифона:
1 – зонд (кантилевер); 2 – металлизированная нить;
3 – эпоксидная смола**



**Рис. 2. Рельеф поверхности металлизированной ткани «шифон»:
а - металлизированные волокна;
б - 3-D изображение металлизированных волокон**

Методом сканирующей зондовой микроскопии установлено, что по всей площади металлизированных волокон параметры шероховатости были практически одинаковыми, за исключение отдельных микрокапель материала покрытия на поверхности ткани (рис. 2, б).

На рис. 3 представлено СЗМ-изображение поверхности металлизированной ткани «шифон» и профилограмма сечения А-А.



**Рис. 3. СЗМ-изображения поверхности
металлизированной ткани «шифон»:**

а - топография поверхности; б - профилограмма сечения А-А

С помощью программного продукта «Nova», предназначенного для работы со сканирующими зондовыми микроскопами, выпускаемыми компанией «НТ-МДТ», были рассчитаны такие характеристики рельефа, как Ra , Rz и построена таблица статистических параметров геометрических свойств поверхности металлизированной ткани «шифон».

**Статистические параметры поверхности
металлизированной ткани «шифон»**

Параметр	Значение
Объем выборки	125
Максимум	1615,1 нм
Минимум	345,6 нм
Разброс высот	520 нм
Высота неровностей профиля по десяти точкам, Rz	553,28 нм
Средняя линия профиля	846 нм
Среднее арифметическое отклонение, Ra	128,06 нм
Дисперсия (разброс распределения вокруг среднего значения)	162,18 нм

Выводы

В результате проведенных исследований поверхности волокнистого материала - ткани «шифон» с титановым нанопокрывие, полученным методом КИБ, с помощью оптической и зондовой микроскопии по разработанной методике установлено, что поверхность ткани имеет развитую структуру, ввиду наличия микрокапель титана, размер которых составляет до 1 мкм, что связано с режимами нанесения покрытия. Получены стати-

стические параметры поверхности металлизированной ткани «шифон». Установлено, что среднее арифметическое отклонение профиля поверхности металлизированной ткани составляет $Ra=128$ нм.

Список литературы

1. G. Buyle Nanoscale finishing of textiles via plasma treatment // Materials Technology, 2009 VOL 24. P. 46-51.
2. Иванов А. В., Любимов В.В., Саломатников М.С. Получение металлических покрытий на текстильных материалах экранирующих электромагнитное излучение в СВЧ – диапазоне длин волн // Сборник трудов. «Высокие, критические электро- и нанотехнологии». Всероссийская НТК. Тула, 2011. С. 78-87.
3. Иванов А. В., Любимов В.В., Саломатников М.С. Разработка процессов получения металлических покрытий нанометровой толщины на гибких объектах // Материалы международной научно-практической конференции «Многомасштабное моделирование структур и нанотехнологии» Тула: Изд-во Тул. гос. пед. ун-та им. Л.Н. Толстого, 2011. С. 65-66.
4. Саломатников М.С. Разработка технологии нанесения металлических покрытий на гибких объектах, экранирующих электромагнитное излучение в СВЧ-диапазоне // Сборник докладов. «Молодежные инновации» VI молодежная научно-практическая конференция Тульского государственного университета; под общей редакцией д-ра техн. наук, проф. Ядыкина Е.А.: в 2 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Ч. I. С. 236-239.

Саломатников Михаил Сергеевич, аспирант, m.s.salomatnikov@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

RESEARCH OF THE RELIEF AND STRUCTURE OF THE TITANIUM NANOCOATING FORMED ON FIBROUS MATERIALS

M.S. Salomatnikov

A study of the structure and topography of the titanium coating of nano-meter thickness on the surface of the resulting fibrous material - fabric "Chiffon" by arc evaporation of the cathode material, followed by bombardment in conditions of low temperature argon plasma activation. The technique of carrying out researches is developed. An assessment of the geometric characteristics of the surface of the metallized fabric using atomic force microscopy.

Key words: topography, structure, nano-coating, textile materials, powders, particles, probe microscopy, nanoroughness.

Salomatnikov Michal Sergeyevich, postgraduate, m.s.salomatnikov@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМЕННОГО КАНАЛА ОПТИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В КАЧЕСТВЕ КАТОДА В ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

Д.В. Козырь

В статье описаны экспериментальные исследования электроэрозионной обработки с использованием плазменных каналов, полученных с помощью оптического пробоя воздуха лазерным излучением. Описана схема лабораторной установки. Приведены параметры обработанных образцов.

Ключевые слова: импульсный плазменный канал, электроэрозионная обработка плазменный катод-инструмент.

Электрофизические и электрохимические методы обработки в классическом представлении имеют ряд недостатков, обусловленных необходимостью уменьшения межэлектродных зазоров, наличием определенного предела по электрической нагрузке, ограничениями, накладываемыми на электрод-инструмент в связи с его механическими свойствами. Используя в качестве инструмента нетвердотельный проводник, обладающий основными свойствами классического электрода-инструмента для электрофизико-химической обработки, можно исключить негативные последствия от воздействия на инструмент различных факторов, сопутствующих процессу обработки.

Одним из способов получения нетвердотельного проводника для использования его в электрофизических и электрохимических методах обработки является способ, основанный на получении импульсного плазменного канала вследствие оптического пробоя различных сред лазерным излучением.

Как известно при превышении определенного порога интенсивности лазерного излучения в среде происходит оптический пробой и на фокальном отрезке аксикона или в перетяжке каустики сферической линзы образуется протяженный плазменный канал. На начальном этапе канал имеет размеры лазерного луча с протяженностью порядка длины фокального отрезка аксикона или перетяжки каустики сферической линзы. В условиях устойчивого пробоя плазменный канал становится сплошным за наносекунды. Импульсные плазменные каналы обладают значительной проводимостью в начальный период времени. Токопроводящий канал образуется практически мгновенно за время, меньшее длительности лазерного импульса. При этом в соответствии с направлением приложенного электрического поля ток может протекать как вдоль, так и поперек плазменного канала. На начальной стадии протекания тока удельная электропроводность может достигать величин порядка 10^6 (Ом*м)^{-1} [1]. Это величина сравнима с удельной электропроводностью графита [2]. Таким образом,

плазменный канал является нетвердотельным проводником который позволяет подводить электроэнергию в область обработки минуя твердотельные электроды

Ввиду того, что формирование плазменных каналов сопровождается наличием ряда физических явлений, в зоне обработки имеют место различные виды энергетических воздействий. Поэтому обработка с использованием протяженных плазменных каналов представляет собой электрофизикохимический процесс с применением плазменных катодов-инструментов.

В зависимости от электрических параметров и технологических схем обработки, воздействие на обрабатываемый материал может осуществляться следующим образом:

1. Анодное растворение материала заготовки;
2. Комбинированный электрохимическо-электроэрозионный процесс;
3. Электроэрозионный механизм удаления материала.

В работе приведены экспериментальные исследования электроэрозионной обработки материалов.

Экспериментальная установка. Для проведения исследований была создана экспериментальная установка (рис. 1).

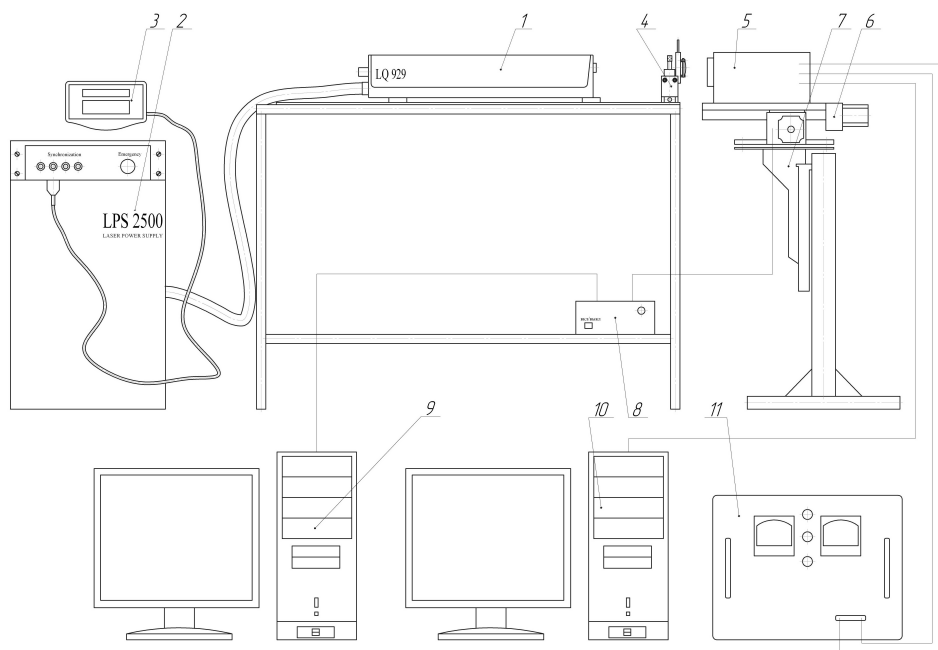


Рис. 1. Схема установки для электроэрозионной обработки с применением импульсного плазменного канала:

- 1 – излучатель; 2 – источник питания лазера; 3 – пульт управления лазером; 4- оптическая система; 5 - электроэрозионная ячейка; 6 – координатный стол; 7 – подъемное устройство; 8 – контроллер координатного стола; 9 – управляющий компьютер координатного стола; 10 – измерительный компьютер; 11 – источник питания**

Для формирования плазменного канала использовался импульсный Nd:YAG лазер, состоящий из излучателя 1, источника питания лазера 2 и пульта управления 3. Лазер позволяет производить генерацию лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 1064$ нм, длительностью импульса $\tau = 9$ нс, энергией импульса $E = 1,5$ Дж, частотой следования импульсов $f = 10$ Гц.

Фокусировка лазерного излучения производилась оптической системой 4, состоящей из сферической линзы с фокусом 118 мм. Импульсный плазменный канал формировался в электроэрозионной ячейке 5, установленной на координатном столе 6 с подъемным устройством 7.

В процессе обработки электроэрозионная ячейка перемещалась с помощью координатного стола 6, управление которым осуществлялось с управляющего компьютера 9 через контроллер 8. Наличие импульсного тока в процессе обработки фиксировалось с помощью измерительного компьютера 10, работающего на основе АЦП.

Источник питания представляет собой РС – генератор, состоящий из конденсатора емкостью 50 мкФ и предельным напряжением 1000 В, который заряжается от мощного трансформатора с передаточным отношением по напряжению 10 и предельным напряжением вторичной обмотки 2200 В. Регулировать величину напряжения первичной обмотки трансформатора позволяет лабораторный автотрансформатор, включенный между сетью 220В и трансформатором.

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены образцы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, титанового сплава ВТ-14 и алюминиевого сплава АК4, представляющие собой пластины квадратного сечения, толщиной 3 мм. Для достижения необходимой величины шероховатости поверхности и удаления измененного слоя после предыдущего вида обработки, образцы шлифовались наждачной бумагой, с постепенным уменьшением размера абразивных частиц. Затем образцы подвергались очистке и обезжириванию.

Результаты и обсуждение. На рисунке 2 представлены фотографии образцов после обработки с использованием плазменного электрода-инструмента. Из анализа фотографий можно сделать вывод о электроэрозионном характере удаления материала образца. Причем, видны различия в морфологии поверхности и размерах полученных пазов для разных материалов. Форма полученного паза повторяет форму плазменного электрода-инструмента. Однако ширина паза возрастает при обработке металлов с более высокой электроэрозионной обрабатываемостью.

Наиболее ярко выраженные электроэрозионные лунки наблюдаются на титановом сплаве ВТ-14. Предположительно, это связано теплофизическими свойствами титана, в частности с высокой температурой плавления. Из-за чего расплавленный металл не растекается по поверхности образца, как это происходит на поверхностях образцов из стали 12Х18Н10Т и алюминиевого сплав АК4 [5].

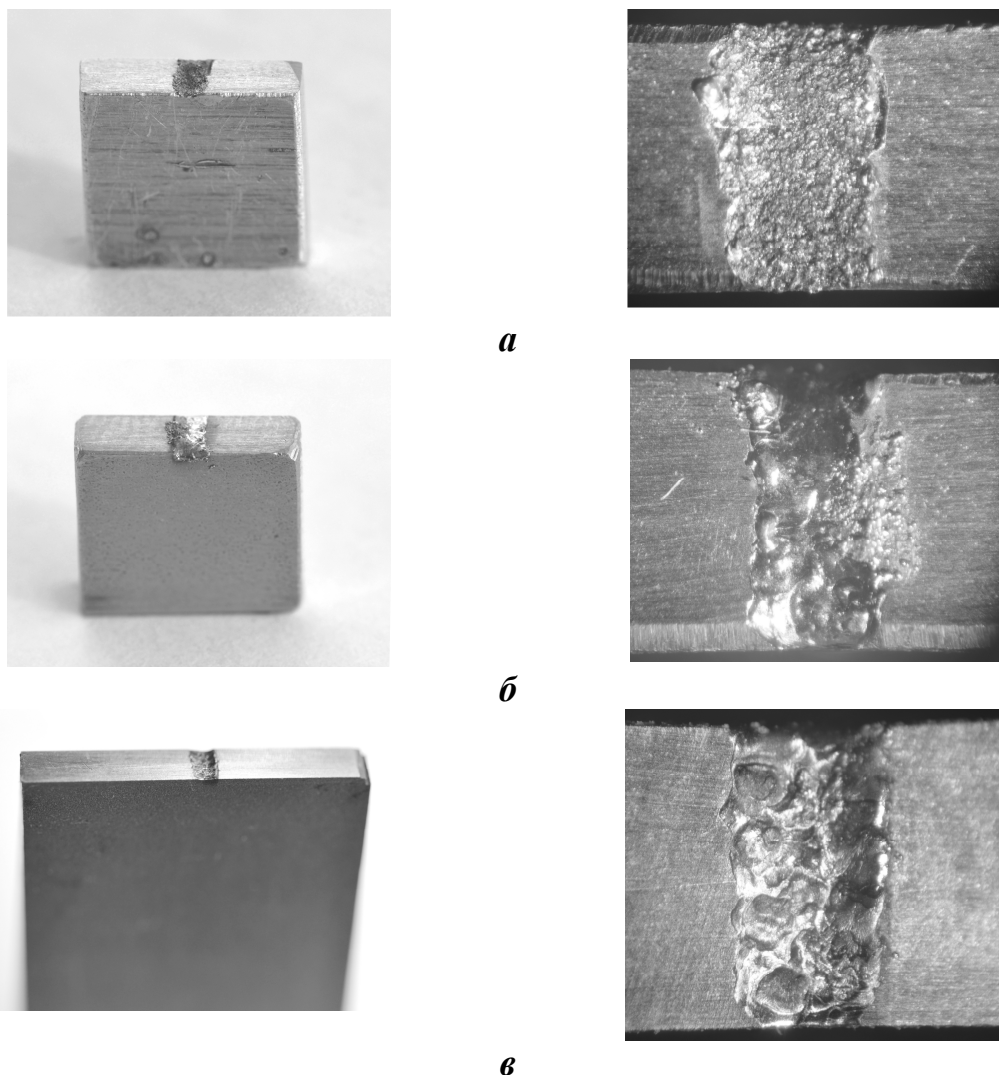


Рис. 2. Фотографии образцов после обработки:
а - алюминиевый сплав АК4; б - сталь 12Х18Н10Т;
в – титановый сплав ВТ-14

Величина микротвердости поверхностей образцов до и после обработки и величина шероховатости обработанных поверхностей образцов приведены в таблицах 1, 2.

Таблица 1.

Величина микротвердости поверхностей образцов

Материал образца	Микротвердость до обработки Нв, МПа	Микротвердость после обработки Нв, МПа
Алюминиевый сплав АК4	267,78	307,54
Сталь 12Х18Н10Т	379,20	661,98
Титановый сплав ВТ-14	590,73	742,72

Таблица 2.

Величина шероховатости обработанных поверхностей образцов

Материал образца	Ra, мкм
Алюминиевый сплав АК4	6,814
Сталь 12Х18Н10Т	5,2
Титановый сплав ВТ-14	4,3

Из таблиц видно, что поверхность образцов упрочнилась на всех используемых материалах. Величина микротвердости возросла в 1,15 раз для алюминиевого сплава АК4, в 1,75 раз для стали 12Х18Н10Т и в 1,25 для титановый сплав ВТ-14. Увеличение микротвердости поверхностей образцов происходит в результате локального кратковременного нагрева поверхностей током электрического разряда и плазменным электродом-инструментом [2]. Наибольшая величина шероховатости обработанных поверхностей зафиксирована для алюминиевого сплава АК4, наименьшая для титанового сплав ВТ-14. Это объясняется величиной отдельных электроэрозионных лунок и их совместным наложением. В соответствии с [2,3,4] наибольшая глубина лунок при идентичных остальных параметрах обработки зависит от теплофизических свойств и наблюдается для материалов с более высокой электроэрозионной обрабатываемостью. Таким образом, характер обработанных поверхностей соответствует традиционным представлениям о электроэрозионной обработке.

Выводы. Приведены результаты экспериментальных исследований процесса электроэрозионного формообразования образцов из алюминиевого сплав АК4, стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ-14 с применением плазменного электрода-инструмента. Выполнен анализ некоторых аспектов качества обработанных поверхностей.

Список литературы

1. Любимов В.В., Сабинин Е.А. Расширение технологических возможностей и обоснование новых технологических схем электрофизико-химических методов обработки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010.
2. Фотеев Н. К. Технология электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1980. 183 с.
3. D.D. DiBitonto, P.T. Eubank, M.R. Patel, M.A. Barrufet, Theoretical models of the electrical discharge machining process-I: a simple cathode erosion model, Journal of Applied Physics 66 (9) (1989). P. 4095–4103.
4. Ahsan Ali Khan, Role of Heat Transfer on Process Characteristics during Electrical Discharge Machining, Developments in Heat Transfer, Editor M. A. Santos Bernardes, (2011).

5. D. Shuvra, K. Mathias, F. Klocke, EDM simulation: finite element-based calculation of deformation, microstructure and residual stresses. Journal of Materials Processing Technology, Vol.142. 2003. P. 434-451.

Денис Владимирович Козырь, аспирант, Kozyr.D.V@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

USE OF PLASMA CHANNEL OPTICAL BREAKDOWN AS A CATHODE IN ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

D.V. Kozyr

Experimental investigations of electrical discharge machining using plasma channels obtained with the optical breakdown of the air by laser radiation were describes. The scheme of the laboratory installation was given. Parameters of processed samples were performed.

Key words: pulsed plasma channel, electro-discharge machining, plasma cathode-tool.

Denis Vladimirovich Kozyr, postgraduate, Kozyr.D.V@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University.

УДК 621.9. 047

**РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ПЛАКИРОВАНИЯ ПОРОШКОВ
СТЕКЛЯННЫХ МИКРОСФЕР В УСЛОВИЯХ
КОМБИНИРОВАННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЧАСТИЦ**

М.С. Саломатников

Описаны преимущества использования металлизированных стеклянных микросфер в качестве наполнителей различных материалов. Приводится анализ современных устройств для плакирования порошков стеклянных микросфер в вакууме. Представлено описание конструкции устройства для плакирования порошков полых стеклянных микросфер в условиях комбинированного перемешивания частиц. Приведены схемы, описывающие принцип работы устройства.

Ключевые слова: устройство, плакирование, металлизация, порошки, стеклянные микросферы, вакуум, покрытие, активация, потенциал смещения, перемешивание.

Продукты порошковой металлургии, в частности, порошки полых стеклянных микросфер правильной сферической формы (рис. 1), представляющие собой легкий сыпучий порошок, размер частиц которого (D) со-

ставляет в пределах от 6 до 235 мкм, находят широкое применение в различных отраслях промышленности [1,2]. Материалом микросфер служит натриевоборосиликатное стекло. Толщина стенки микросферы (n) варьируется в пределах от 2 до 6 мкм, в зависимости от размера частицы.

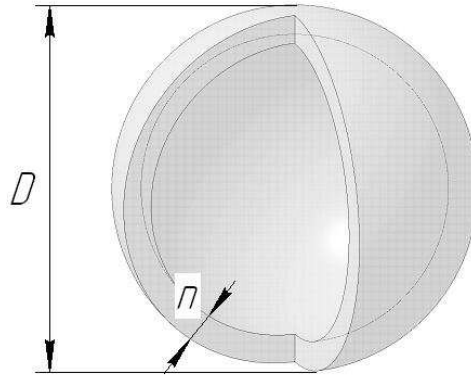


Рис. 1. 3D-модель полых стеклянных микросфер

Указанные микросферы нашли применение, в качестве наполнителя, в различных основах со множеством функциональных назначений для создания композиционных материалов. На сегодняшний день полые стеклянные микросферы используются при создании: строительных материалов (цемент, краски, лаки, шпатлевки и т.д.) с теплоизоляционными свойствами, для снижения веса и повышения жесткости; фильтров агрессивных сред (кислот, щелочей); формовочных масс в медицине; экипировки водолазов и подводной аппаратуры для создания теплосберегающих конструкций с повышенной плавучестью.

Предлагается на поверхности полых стеклянных микросфер формировать металлическую оболочку (плакировать), путем нанесения покрытия, например, металлов, сплавов или соединений (оксидов, нитридов, боридов и т.д.). Плакирование полых стеклянных микросфер способствует получению у них принципиально новых свойств, таких например, как коррозионностойкие, повышенные прочностные, теплосберегающие, радиозащитные и другие свойства. Однако существует ряд задач в плакировании порошков полых стеклянных микросфер, связанных с высокой хрупкостью и дисперсностью частиц порошка (рис. 2), невозможностью производить металлизацию в растворах электролитов, ввиду, высокой степени плавучести микросфер.

Наибольшее распространение в области получения покрытий на порошковых материалах получили методы металлизации в вакууме или среде рабочего газа (аргон, кислород, азот и т.д.), с использованием технологий физического осаждения частиц (PVD-технологии).

В ряде работ [3-6] предлагается использовать различные устройства для плакирования порошковых материалов, однако, большинство из них

имеет определенные недостатки, связанные например, с наличием большого количества подвижных элементов [3,4], что требует надежную систему вакуумирования рабочей камеры и повышает стоимость оборудования. При плакировании порошковых материалов по схеме «песочные часы» указанной в работе [3] имеются критические нагрузки на поверхность частиц порошков, что может привести к разрушению полых стеклянных микросфер указанных конфигураций.

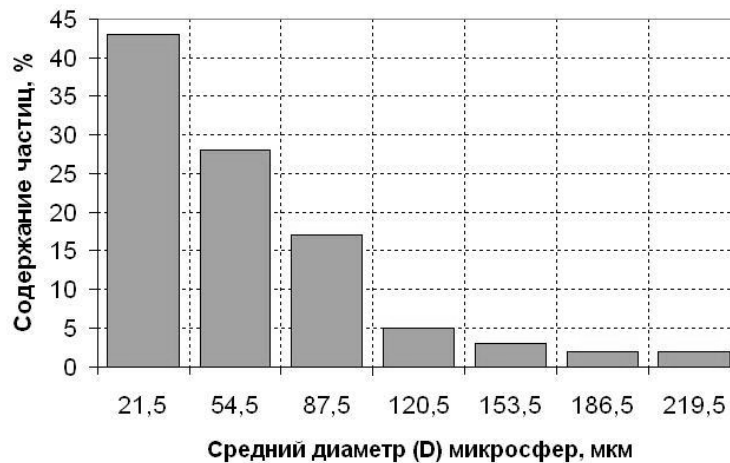


Рис. 2. Распределение по размерам частиц стеклянного порошка

Использование в устройствах [5,6] ванн на основе электромагнитов позволяет осуществлять перемешивание частиц в условиях виброожиженного или виброкипящего слоя, однако, в случае обработки полых стеклянных микросфер будут формироваться агломераты из-за статического притяжения стеклянных микросфер при их движении в вибрационном слое. Также ванны на основе электромагнитов ограничивают температуру металлизации порошковых материалов, что может в дальнейшем сказаться на адгезии покрытия к основе частицы порошка.

В работе устройства [6], в конструкции которого подразумевается использовать перемешивающие пружины в комбинации с неметаллической вибрационной ванной, не обеспечивается тщательное перемешивание порошка высокой дисперсности, кроме того присутствуют чрезмерные нагрузки на частицы порошка, за счет воздействия пружин, при механическом разрушении агломератов, образующихся при виброперемешивании, что может привести к разрушению полых стеклянных микросфер указанной конфигурации. Кроме того из-за наличия между частицами порошка и генератором потока частиц напыляемого материала покрытия металлической сетки и рамы с закрепленными пружинами, увеличивается время металлизации порошка.

В качестве альтернативы на кафедре «Электро- и нанотехнологии» Тульского государственного университета было разработано устройство

для плакирования порошков полых стеклянных микросфер на основе промышленной установки для нанесения износостойких покрытий ВУ-1Б (рис. 1).

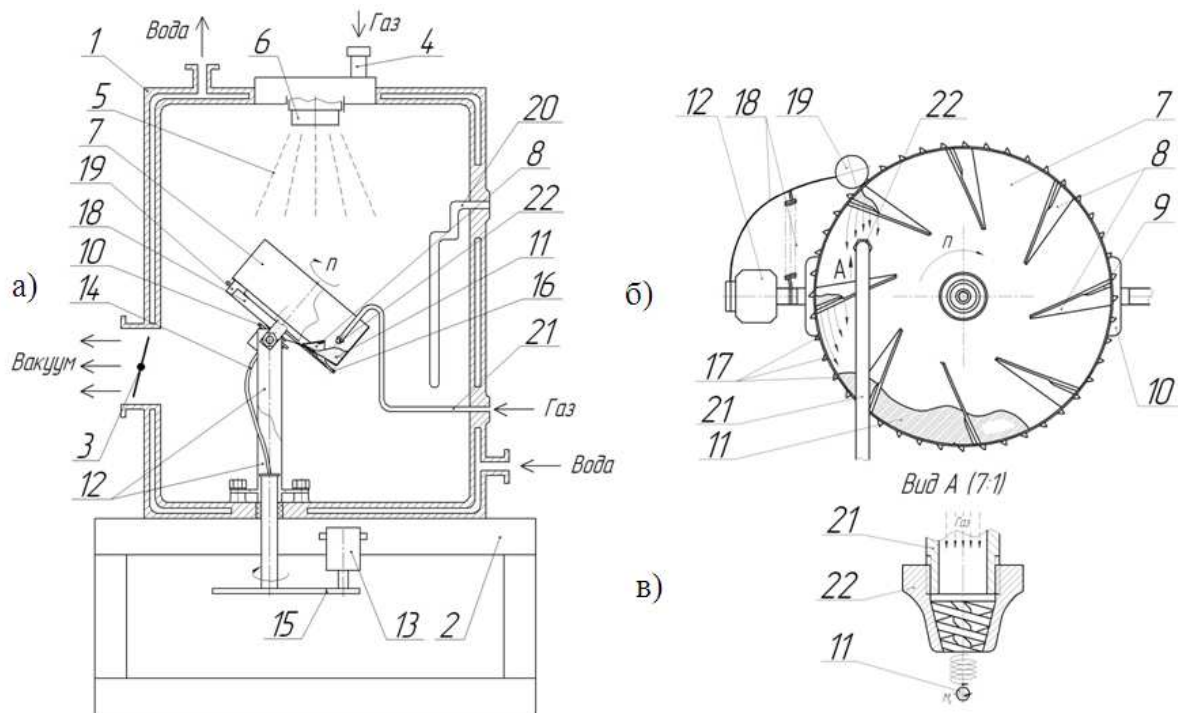


Рис. 3. Устройство для плакирования порошков полых стеклянных микросфер:

а - схема устройства; б - виброперемешиватель-держатель порошка; в - вихревая форсунка

Конструктивно устройство состоит из вакуумной камеры 1, установленной на раме 2, системы откачки воздуха 3, системы подачи рабочего газа 4 (аргон, азот и другие), дугового испарителя 6, являющегося катодом (в качестве анода выступает вся внутренняя поверхность вакуумной камеры 1) и генерирующим поток напыляемых частиц 5 материала покрытия, виброперемешивателя-держателя порошка, выполненного в виде металлической чаши 7 с лопатками 8 (наличие электропроводной чаши снижает статическое взаимодействие между стеклянными частицами порошка), имеющими выступы 9 для перемешивания стеклянных микросфер. Чаша 7 с обрабатываемым порошком микросфер 11 базируется на платформе 10, установленной на стойках 12, имеющую возможность поворота на угол $0...45^{\circ}$, относительно вертикальной оси, в зависимости от конфигураций обрабатываемого порошка. Чаша 7 кинематически связана с приводом вращения 13 с помощью токопроводящего гибкого вала 14 и зубчатой передачи 15. Частота вращения чаши 7 может варьироваться в пределах от 4 до 25 об/мин. Токопроводящий гибкий вал связан с источником опорного

напряжения для создания смещающего потенциала чаши для осуществления предварительной очистки, активации и имплантации высокоэнергетических ионов в поверхностный слой стеклянных микросфер.

В основании чаши 7 имеется зубчатое колесо 16 с зубьями 17, которым при вращении чаши совершаются удары кулачком 19, прижатым с помощью пружин 18, тем самым создаются условия перемешивания порошка в виброожиженном слое. Было взято во внимание, что в виброожиженном слое обрабатываемого порошка происходит агломерация частиц стеклянных микросфер, поэтому было предложено осуществлять создание виброожиженного слоя по циклической схеме, чтобы микросферы не успевали объединяться в агломераты.

Дополнительно в вакуумную камеру 1 установлен нагреватель 20 для активации поверхности частиц порошков термическим воздействием.

В вышеуказанных работах [3, 4, 6] отмечалось, что для увеличения интенсивности перемешивания порошков при плакировании использовали схемы с пересыпанием и перемешивание частиц пружинами с переменной намоткой. Для повышения качества и равномерности покрытия на порошках стеклянных микросфер в данном устройстве предлагается использовать систему перемешивания частиц порошка турбулентным потоком газа, например, аргоном, для создания дополнительного крутящего момента M_y (рис. 4). Система перемешивания состоит из установленного в вакуумной камере 1 трубопровода 21 и вихревой форсунки 22, создающей поток турбулентного газа. Мощность потока устанавливается в зависимости от конфигураций обрабатываемого порошка. Трубопровод 21 с форсункой 22 подведены к лопатке 8, в зону, так называемого «полета частиц», где частицы имеют крутящий момент M_x .

При ссыпании микросферы с лопатки 8 на нее действует сила со стороны других частиц P и силы тяжести G (силы виброожиженного слоя не указаны, т.к. процесс носит вероятностный характер), которые способствуют созданию крутящего момента M_x при прохождении частицы через выступ 9 для «обновления» поверхности металлизации частицы. Не исключено, что некоторой доле частиц крутящий момент M_x не задается, для этого турбулентным потоком газа задается дополнительный крутящий момент M_y .

Преимуществом указанного устройства является: возможность металлизации частиц порошков различными металлами, сплавами и соединениями с предварительной активацией частиц порошков высокоэнергетическими ионами; отсутствием критических нагрузок на поверхность полых стеклянных микросфер, что исключает их разрушение при обработки; осуществление обработки в условиях комбинированного перемешивания порошков (механическое перемешивание лопатками, циклическим виброожиженным слоем, турбулентным потоком рабочего газа); отсутствие сложных подвижных и вибрационных систем, что снижает себестоимость

изготовления устройства.

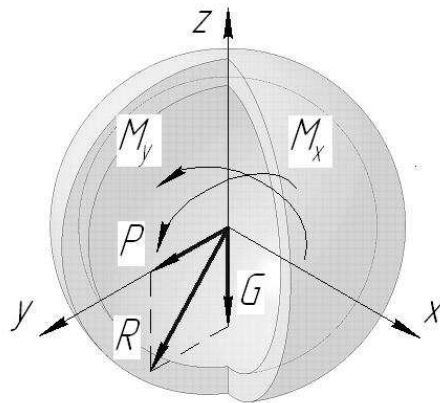


Рис. 4. Схема сил и моментов, действующих на полую стеклянную микросферу в зоне «полета частиц»

В настоящее время авторы устройства плакирования порошков стеклянных микросфер работают над завершением разработки прототипа конструкции. Были проведены предварительные экспериментальные исследования по плакированию стеклянных микросфер покрытием титаном при вышеуказанных условиях перемешивания частиц, за исключения перемешивания потоком турбулентного газа. Однако, стоит отметить, что эксперименты имели успешный результат, так как удалось получить равномерное покрытие примерно на 95% частиц от объема обрабатываемого порошка, учитывая разницу в диаметре микросфер порядка 40 раз [1,2]. Разрушение стеклянных микросфер не наблюдалось.

Список литературы

1. Иванов А.В., Саломатников М.С. Получение металлических покрытий нано-толщины на мелкодисперсных стеклянных порошках // Материалы Международной заочной научной конференции «Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы». Саратов, 2012. С. 45-52.
2. Саломатников М.С. Методика ионно-плазменного плакирования мелкодисперсных стеклянных порошков // Материалы докладов XI Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов». Тула, 2012. С. 308-312.
3. Михайлюк В.И. [и др.] Способ металлизации порошков и микросфер из газовой фазы и устройство для его осуществления. Патент Ru № 2307004: Заявл. 20.04.2007. Опубл. 27.09.2007.
4. Новиков Н. Н., Пустотина С. Р. Устройство для нанесения покрытий на порошки. Патент СССР № 1097449. От 15.06.84.

5. Селиверстов И.А. [и др.] Анализ процесса вакуумной металлизации порошковых материалов в виброкипящем слое / Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» 2009. С. 116-123.

6. Карпов И.В. [и др] Устройство для нанесения покрытий на порошки. Патент RU №2486990: Заявл. 19.04.2012. Оpubл. 10.07.2013

Саломатников Михаил Сергеевич, аспирант, m.s.salomatnikov@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

*DEVELOPMENT OF THE DEVICE OF CLADDING OF POWDERS OF GLASS
MICROSPHERES IN THE CONDITIONS OF THE COMBINED MIXING OF PARTICLES*

M.S. Salomatnikov

The advantages of using metallic glass microspheres as fillers in various materials are described. An analysis of modern devices for cladding of powders of glass microspheres is provided in vacuum. The description of a design of the device for cladding of powders of hollow glass microspheres in the conditions of the combined mixing of particles is submitted. The schemes describing the principle of operation of the device are provided.

Key words: device, cladding, metal powders, glass microspheres, vacuum coating, activation, bias potential, mixing.

Salomatnikov Michal Sergeyevich, postgraduate, m.s.salomatnikov@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.391, 681.3, 519.86

ЗАКОНОМЕРНОСТИ КАСКАДОВ БИФУРКАЦИЙ СИНГУЛЯРНЫХ АТТРАКТОРОВ В НЕКОТОРЫХ СИСТЕМАХ СКРЫТОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

И.Е. Агуреев, К.И. Агуреев, Н.С. Пастухова

Рассмотрены закономерности каскадов бифуркаций в некоторых автономных диссипативных системах обыкновенных дифференциальных уравнений, используемых для формирования на их основе систем скрытой передачи информации. Эти закономерности заключаются в проявлении свойств мультиаттракторности и наличия контрастных структур за пределами положений теории Фейгенбаума-Шарковского-Магницкого.

Ключевые слова: нелинейная диссипативная система, нерегулярный аттрактор, хаотическая синхронизация, система скрытой передачи информации.

В работах [1-2] развиты основы нового подхода к теории динамического хаоса, который вкратце заключается в единственности и универсальности сценария перехода к хаосу через каскады бифуркаций Фейгенбаума-Шарковского-Магницкого (ФШМ). При этом наличие динамического хаоса в системах обусловлено исключительно присутствием в системах так называемых сингулярных аттракторов. В работах [3-9] построены и исследованы некоторые диссипативные системы, демонстрирующие сложное динамическое поведение. Были обнаружены целые семейства топологически разных простых сингулярных предельных циклов, являющихся началом каскадов бифуркаций ФШМ, приводящих к появлению более сложных сингулярных циклов, содержащих траектории, стремящиеся к гетероклиническим и гомоклиническим контурам. Эти сложные сингулярные циклы демонстрируют переходы к хаосу и некоторые типы поведения, имеющие скачки, всплески, которые названы контрастными структурами [10]. В результате, за пределами каскадов ФШМ, в некоторых диссипативных системах эволюция аттракторов может приводить к возникновению контрастных аттракторов, то есть таких, которые содержат соответствующие структуры в поведении. Кроме того, найдено, что в параметрических пространствах, судя по всему, могут существовать бесконечные множества тополо-

гически эквивалентных простых сингулярных предельных циклов, демонстрирующих сложную эволюцию через каскады ФШМ к контрастным аттракторам. Если же в системе имеются преобразования симметрии, то типы динамического поведения соответственно умножаются.

В публикациях [11-23] рассмотрены различные современные аспекты, касающиеся топологий, эволюции и классификации хаотических траекторий. В работах Спротта, Лю, Чена и др. [18-23] обсуждаются вопросы существования хаотических режимов в наиболее простых по виду системах обыкновенных дифференциальных уравнений. Устанавливаются связи между известными системами Лоренца и Чена, исследуется вопрос существования различных по топологии нерегулярных аттракторов в одной и той же системе.

Установлено, что многие из систем могут являться предметом исследований с точки зрения поиска условий хаотической синхронизации. Предлагаются различные схемы генераторов, соответствующих тем или иным динамическим моделям. Подобные исследования могут иметь приложения в технологиях скрытой передачи информации (стенографии) [24, 25].

Анализ некоторых автономных диссипативных систем. В настоящей работе рассматриваются закономерности каскадов бифуркаций, которые могут происходить в трехмерных гладких автономных диссипативных системах обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) с нелинейностями правых частей порядка не выше 2:

$$\begin{cases} \dot{x} = k_1 z - k_2 y - k_3, \\ \dot{y} = k_4 x - k_5 z, \\ \dot{z} = k_6 x - k_7 y + k_8 y^2 + k_9 xy + k_{10} z^2 - k_{11} xz, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = k_1 z - k_2 yz; \\ \dot{y} = k_3 x - k_4 y - k_5 xy; \\ \dot{z} = -k_6 x - k_7 z + k_8 xy + k_9 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = k_1 x + k_2 y + k_3 z + k_4 xz + k_5 yz + k_6 z^2 + k_7; \\ \dot{y} = k_8 xz + k_9 yz + k_{10} z^2 + k_{11} z; \\ \dot{z} = k_{12} x + k_{13} y + k_{14}. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = k_1 y + k_2 z - k_3 xz + k_4 yz - k_5 z^2; \\ \dot{y} = -k_6 y - k_7 xz + k_8; \\ \dot{z} = -k_9 x - k_{10} z + k_{11} xy + k_{12} xz - k_{13} yz + k_{14}. \end{cases} \quad (4)$$

Перечисленные системы были разработаны автором публикаций [3, 4] в качестве моделей для описания различных транспортных процессов и

систем. При их численном исследовании [5-8] обнаружилось сложное поведение, которое представляет самостоятельный интерес с точки зрения классификации нелинейного поведения в подобных системах. Было замечено, что системы (1)-(4) пригодны для изучения явления хаотической синхронизации, что делает возможной постановку задачи математического моделирования различных схем скрытой передачи информации (СПИ) [9].

Особенностями систем ОДУ (1)-(4) является высокая размерность параметрических пространств, что обуславливает с одной стороны сложность исследования закономерностей каскадов бифуркаций и представления полученных в них результатов, а с другой стороны дает значительное количество новой информации о поведении систем такого класса.

В основе подхода при исследовании систем лежат результаты, полученные Н. А. Магницким и С. В. Сидоровым [1, 2]. Исследование выполнялось численно методом Рунге-Кутты 4-го порядка с постоянным шагом с точностью $1 \cdot 10^{-6}$. Рассмотрим в качестве характерного примера вариант системы (3), приняв параметры в соответствии с ниже приведенной таблицей. В ней обозначения коэффициентов приведены, как это сделано в работах [3, 4].

Параметры в системе (3)

a	b	c	d	e	k	l	m	n	g	X	Y	Z
1,2	5	2	1	0,3	5	2	6	0,4	1	4	5	7

В качестве бифуркационного выберем параметр f . Проследим эволюцию фазового портрета системы при изменении параметра f от 0,4 до 0,059. Сначала наблюдается каскад бифуркаций удвоения периода. При $f = 0,4$ в системе можно обнаружить устойчивое стационарное состояние. При $f = 0,19$ существует цикл периода 1, при $f = 0,14$ цикл периода 2, а при $f = 0,124$ – цикл периода 4. При $f = 0,11$ наблюдается аттрактор Фейгенбаума – простейший хаотический аттрактор. Последующий субгармонический каскад бифуркаций аттрактора Фейгенбаума приводит в соответствии с порядком Шарковского к циклу периода 3 при $f = 0,095$.

Дальнейшее уменьшение параметра f ведет к гомоклиническому каскаду (по терминологии Н. А. Магницкого гомоклиническим называется каскад бифуркаций, являющийся продолжением порядка Шарковского и заключающийся в многостадийном появлении устойчивых циклов типа C_n , где n – номер стадии, приближающихся к гомоклиническому контуру и претерпевающих собственные субгармонические каскады бифуркаций) [1]. Были обнаружены циклы C_8 при $f = 0,0703$, C_7 при $f = 0,08$, C_5 при $f = 0,0867$, C_4 при $f = 0,0765$. При $f = 0,059$ «глаз» аттрактора закрывается

полностью (рис. 1), что свидетельствует о полноте гомоклинического каскада.

Заметим, что фазопараметрическая диаграмма не меняется при увеличении значения шага интегрирования даже в 20 раз. Это позволяет сделать вывод о независимости решения от шага интегрирования. Таким образом, наблюдаемые решения реально существуют в фазовом пространстве.

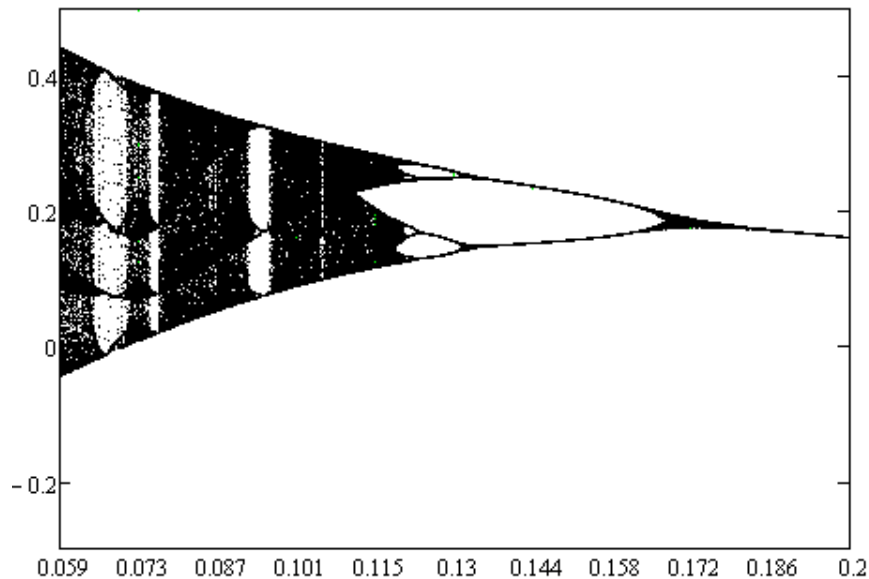


Рис. 1. Фазопараметрическая диаграмма модели (3)

Эволюция аттракторов в рассматриваемой системе при уменьшении параметра f приводит к решениям, которые подходят согласно [10] под понятие «контрастных структур». Контрастными структурами называются такие режимы скачков медленных переменных x в сингулярно возмущенной задаче Коши вида $\dot{x} = A(x, y)$, $\tau \dot{y} = B(x, y)$, $x(0) = x_0$, $y(0) = y_0$, когда выполняются следующие условия:

существует по крайней мере два многообразия медленных движений, из которых только одно устойчиво;

существует область начальных значений, при которых возможен уход фазовой траектории в бесконечность при $\tau \rightarrow 0$;

существует особенность структуры, которая обеспечивает возврат фазовых траекторий из бесконечности;

в фазовом пространстве существует механизм срыва фазовой точки с устойчивого многообразия.

Продолжим бифуркационную диаграмму системы (3), приближая параметр f к 0. Обнаруженные результаты изображены на рис. 2.

Таким образом, бифуркации проходят последовательность, начиная

с удвоения периода предельного цикла, затем наблюдается субгармонический и гомоклинический каскады, а далее более сложный каскад, приводящий к контрастным структурам. Исследуемый пример представляет собой гладкую диссипативную систему, в которой наблюдаются скачки и всплески.

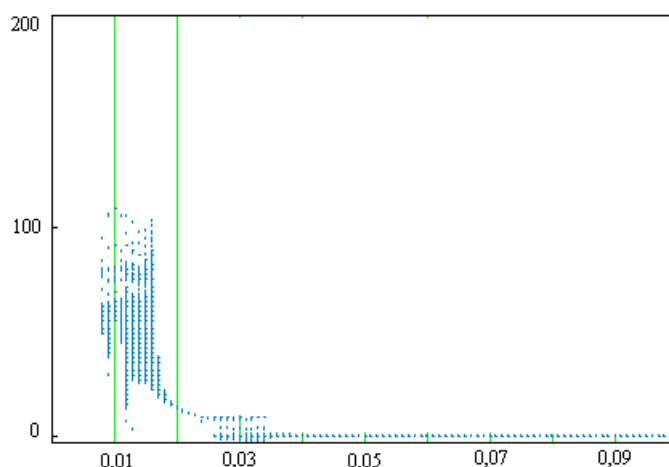


Рис. 2. Закономерность поведения системы (3) за пределами каскадов ФШМ

Для построенных систем модельных уравнений (1)-(4), содержащих обширные семейства топологически отличных регулярных циклов и соответствующих им сингулярных аттракторов, в настоящей работе получены результаты, которые свидетельствуют, что за пределами каскадов бифуркаций ФШМ эволюция аттракторов может приводить к возникновению контрастных аттракторов, то есть таких, которые содержат соответствующие структуры в поведении. Найдено, что в параметрических пространствах могут существовать бесконечные множества топологически эквивалентных простых сингулярных предельных циклов, демонстрирующих сложную эволюцию через каскады ФШМ к контрастным аттракторам. Рассмотренные модели могут быть использованы в качестве базовых для теоретического исследования работы систем скрытой передачи информации.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-08-01359).

Список литературы

1. Магницкий Н. А., Сидоров С. В. Новые методы хаотической динамики. М.: Эдиториал УРСС, 2004. 320 с.
2. Магницкий Н. А. Теория динамического хаоса. М.: Изд-во URSS

(ЛЕНАНД), 2011. 320 с.

3. Агуреев И. Е. Нелинейная динамика в теории автомобильных транспортных систем // Изв. ТулГУ. Сер. «Автомобильный транспорт». Вып. 9. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. С.3-13.

4. Агуреев И. Е. Нелинейные модели транспортных процессов и систем // Изв. ТулГУ. Сер. «Автомобильный транспорт». Вып. 10. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. С.3-11.

5. Агуреев И. Е. Применение теории Фейгенбаума-Шарковского-Магницкого для анализа модели конкуренции двух автомобильных перевозчиков // Труды Института системного анализа Российской академии наук. Динамика неоднородных систем / под ред. С. В. Емельянова. Т. 33. Вып. 12. М.: Издательство ЛКИ, 2008. С. 159-175.

6. Агуреев И. Е., Тропина В. М. Динамика логистической системы в транспортных цепях поставок // Изв. ТулГУ. Техн. науки. Вып.4, 2011. С.158-167.

7. Агуреев И. Е., Богма А. Е., Пышный В. А. Динамическая модель транспортной макросистемы // Изв. ТулГУ. Техн. науки. Вып.6 (Ч.2), 2013. С.139-145.

8. Агуреев И. Е., Атлас Е. Е. Хаотическая динамика в системах транспорта // Сложность. Разум. Постнеклассика. Сургут-Тула-Ханновер-Вашингтон. 2012. №1. С.95-107.

9. Агуреев И. Е., Агуреев К. И. Численный анализ процессов скрытой передачи информации на основе мультиаттракторной системы // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. № 10. С. 169-177.

10. Неймарк Ю. И., Смирнова В. Н. Контрастные структуры, предельная динамика и парадокс Пэнлеве // Дифференциальные уравнения. 2001. Т.37. № 11. С.1507-1515.

11. Wang Z., Sun Y., Cang S. A 3-D spherical chaotic attractor // Acta Physica Polonica B. Vol. 42. No.2. 2011. P.235-247.

12. Anastassiou S., Bountis T., Petalas Y. G. On topology of the Lü attractor and related systems // Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical. 41. 2008. 485101. 13 p.

13. Гонченко А. С., Гонченко С. В., Шильников Л. П. К вопросу о сценариях возникновения хаоса у трехмерных отображений // Нелинейная динамика. 2012. Т.8. № 1. С.3-28.

14. Треблер А. А. О классификации аттракторов нелинейных диссипативных систем ОДУ // Труды ИСА. 2009. № 44. С.126-146.

15. Letellier Ch., Amaral G. F. V., Aguirre L. A. Insights into the algebraic structure of Lorenz-like systems using feedback circuit analysis and piecewise affine models // Chaos 17, 023104. 2007. 11 p.

16. Yang X.-S. On observability of 3D continuous-time autonomous chaotic systems based on scalar output measurement // Int. J. of Bifurcation and Chaos, Vol. 12. No. 5 (2002). P.1159-1162.

17. Luo X., Danca M.-F., Chen G. On a dynamical system with multiple chaotic attractors // *Int. J. of Bifurcation and Chaos*, Vol. 17. No. 9 (2007). P.3235-3251.
18. Lü J., Chen G. A new chaotic attractor coined // *Int. J. of Bifurcation and Chaos*, Vol. 12. No. 3 (2002). P.659-661.
19. Lü J., Chen G., Cheng D., Celikovsky S. Bridge the gap between the Lorenz system and the Chen system // *Int. J. of Bifurcation and Chaos*, Vol. 12. No. 12 (2002). P.2917-2926.
20. Elhadj Z., Sprott J. C. Some Open Problems in Chaos Theory and Dynamics // *Int. J. Open Problems Comp. Math.*, Vol. 4, No. 2. 2011. 10 p.
21. Sprott J. C. A new class of chaotic circuit // *Physics Letters A* 266 (2000). P.19-23.
22. Sprott J. C. Simple chaotic systems and circuits // *Am. J. Phys.* Vol. 68 No.8. 2000. P.758-763.
23. 21. Sprott J. C. Simplest dissipative chaotic flow // *Physics Letters A* 228 (1997). P.271-274.
24. Дмитриев А. С., Панас А. И. Динамический хаос: Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит. 2002. 252 с.
25. Короновский А. А., Москаленко О. И., Храмов А. Е. О применении хаотической синхронизации для скрытой передачи информации // *Успехи физических наук*. 2009. Т. 179. № 12. С.1281-1310.

Агуреев Игорь Евгеньевич, д-р техн. наук, декан факультета транспортных и технологических систем, agureev-igor@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Агуреев Константин Игоревич, аспирант, clickhere@bk.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Пастухова Наталья Сергеевна, аспирант, natusya-e@rambler.ru, Тула, Тульский государственный университет

THE REGULARITIES OF BIFURCATION CASCADES OF SINGULAR ATTRACTORS IN SOME SECURE COMMUNICATION SYSTEMS

I.E. Agureev, K.I. Agureev, N.S. Pastukhova

The regularities of bifurcation cascades in some autonomous dissipative systems of ordinary differential equations used for the forming secure communication systems on their basis are considered. These regularities are in the properties of the obtaining of the lot attractors (multiattractor systems) and contrasty structures out of the basis of Feigenbaum-Sharkovskii-Magnitskii's theory.

Key words: nonlinear dissipative system, non-regular attractor, chaotic synchronization, secure communications.

Agureev Igor Evgenjevich, doctor of technical science, dean of faculty of transportation and technological systems, agureev-igor@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Agureev Konstantin Igorevich, postgraduate, clickhere@bk.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Pastukhova Nataliya Sergeevna, postgraduate, natusya-e@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.391, 681.3

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СИНГУЛЯРНЫХ АТТРАКТОРОВ В НЕКОТОРЫХ АВТОНОМНЫХ ДИССИПАТИВНЫХ МУЛЬТИАТТРАКТОРНЫХ СИСТЕМАХ

И.Е. Агуреев, К.И. Агуреев, А.В. Гладышев

Рассмотрены некоторые автономные диссипативные системы обыкновенных дифференциальных уравнений, используемые для формирования на их основе систем скрытой передачи информации. Построены и приведены последовательности существующих в них сингулярных аттракторов, обосновывающие мультиаттракторную природу моделей. Выполнен предварительный анализ их бифуркационного поведения, соответствующего современным представлениям теории динамического хаоса (теории Фейгенбаума-Шарковского-Магницкого).

Ключевые слова: нелинейная диссипативная система, нерегулярный аттрактор, хаотическая синхронизация, система скрытой передачи информации.

В монографиях [1, 2] показано, что в автономных диссипативных системах обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) единственным универсальным сценарием перехода к хаосу является последовательность каскадов бифуркаций Фейгенбаума удвоения периода исходного устойчивого сингулярного цикла, субгармонического каскада бифуркаций Шарковского рождения устойчивых циклов любого периода вплоть до цикла периода три и, при наличии в системе петли сепаратрисы седло-фокуса или гетероклинического контура, – гомоклинического или гетероклинического каскада бифуркаций Магницкого устойчивых циклов, сходящихся к гомоклиническому или гетероклиническому контуру. Данное утверждение составляет основу теории ФШМ, используемой в настоящей работе для анализа систем [3-8], которые применяются для исследования

условий синхронизации построенных теоретически на их основе хаотических генераторов [9].

В работах [3-8] выполнялись численные исследования различных автономных диссипативных систем, полученных при моделировании некоторых транспортных процессов. Их анализ показывает, что, во-первых, существенно расширяется представление о геометрии нерегулярных решений. Можно утверждать, что найдены неизвестные до сих пор формы нелинейных колебаний, которые требуют детального исследования. Во-вторых, среди полученных решений достаточно много таких, которые вполне могут использоваться в качестве модельных систем для описания эффектов типа «жесткой турбулентности» без привлечения аппарата «русел и джокеров». В-третьих, обнаруживаются некоторые признаки «периодичности» получаемых решений (паттернов поведения) в одной и той же исследуемой системе. Это означает, что аттракторы образуют последовательности топологически разных, но связанных между собой решений, которые иногда составляют симметричные группы. В-четвертых, в различных по структуре правых частей системах могут получаться топологически одинаковые решения (например, типа аттрактора Лоренца, Ресслера или других более сложных).

В настоящей работе исследуются только автономные диссипативные системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Общим для формирования всех моделей является представление их в виде:

$$\dot{x} = F(x, \mu)$$

или

$$\dot{x} = F(x, t, \mu),$$

где $x \in M \subset R^m$, $\mu \in L \subset R^k$, $t \in I \subset R$, k и m – размерности соответственно параметрического и фазового пространств.

Модель 1. Рассмотрим динамическую систему, которая описывает макроскопическую динамику транспортных процессов [7]. Переменными здесь являются: x – количество выполненной транспортной работы; y – суммарные потери времени при выполнении работы x ; z – инвестиции, направленные на развитие транспортной системы.

$$\dot{x} = \tilde{k}_1 z - \tilde{k}_2 y - \tilde{k}_3; \quad (1)$$

$$\dot{y} = \tilde{k}_4 x - \tilde{k}_5 z; \quad (2)$$

$$\dot{z} = \tilde{k}_6 (z - \tilde{k}_7 x) z + \tilde{k}_8 y (y - Y_1) + \tilde{k}_9 x (y - Y_2). \quad (3)$$

Систему уравнений (1) – (3) можно переписать в виде

$$\begin{cases} \dot{x} = k_1 z - k_2 y - k_3, \\ \dot{y} = k_4 x - k_5 z, \\ \dot{z} = k_6 x - k_7 y + k_8 y^2 + k_9 xy + k_{10} z^2 - k_{11} xz, \end{cases} \quad (4)$$

которая является диссипативной, если

$$z < \frac{k_{11}}{2k_{10}} x, \quad (5)$$

что следует из условия диссипативности

$$\operatorname{div} F(x, y, z) = \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{z}}{\partial z} < 0. \quad (6)$$

Особые точки системы (4) находим по формулам:

$$z_{1,2}^* = \frac{-B \pm \sqrt{D}}{2A}; A = \frac{k_1^2}{k_2^2} k_8 - \frac{k_5}{k_4} k_{11} + k_{10} \neq 0; B = \frac{k_5 k_6}{k_4} - \frac{k_1 k_7}{k_2} - 2 \frac{k_1 k_3 k_8}{k_2^2};$$

$$C = \frac{k_3 k_7}{k_2} + \frac{k_3^2}{k_2^2} k_8; D = B^2 - 4AC; x_{1,2}^* = \frac{k_5}{k_4} z_{1,2}^*; y_{1,2}^* = \frac{k_1}{k_2} z_{1,2}^* - \frac{k_3}{k_2}.$$

Интегрирование системы уравнений (1)–(3) требует, как правило, аппроксимации решения различными линейными функциями на последовательных малых отрезках времени (шагах) длительности τ . Самым распространенным методом такой аппроксимации является метод Рунге-Кутты 4-го порядка. В работе [2] исследовался вопрос о том, существуют ли реально в нелинейных системах дифференциальных уравнений те эффекты, которые получены при их численном решении даже методами высокого порядка точности. При этом утверждается, что аттракторы разностных схем для обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений с частными производными приближаются к истинным аттракторам нелинейных систем дифференциальных уравнений при стремлении параметров дискретизации к нулю. Представлена оценка устойчивости численного интегрирования систем дифференциальных уравнений, имеющих асимптотически орбитально устойчивые периодические решения, которая говорит о том, что при интегрировании систем уравнений с устойчивым периодическим решением численным методом k -го порядка ($k \geq 2$) аппроксимации с шагом τ на интервале времени $0 \leq t \leq T \approx C_1 / \tau$ численное решение имеет точность $O(\tau^{k-1})$. Это дает основание считать, что полученные в настоящей статье численно методом Рунге-Кутты 4-го порядка аттракторы являются достаточно точными аппроксимациями истинных аттракторов, существующих в рассматриваемых системах. Отметим, следуя [1, 2], что если численное решение системы (4), равно как и любой другой нелинейной системы ОДУ, сходится к некоторому численному регулярному аттрактору, то такой аттрактор является достаточно точным приближением к ис-

тинному аттрактору системы. Если же численная траектория блуждает в некоторой ограниченной области фазового пространства, то это еще не значит, что система имеет здесь нерегулярный аттрактор.

В ходе выполнения вычислительного эксперимента ставилась задача обнаружения в модели (1)–(3) различных типов динамического поведения. Так, был получен аттрактор (сингулярный предельный цикл, рис.1) при следующих значениях коэффициентов системы

$$\tilde{k}_1 = 7, \tilde{k}_2 = 4, \tilde{k}_3 = 2, \tilde{k}_4 = 0,7, \tilde{k}_5 = 0,6, \tilde{k}_6 = 1, \tilde{k}_7 = 5, \tilde{k}_8 = 8, \\ \tilde{k}_9 = 0,7, \tilde{k}_{10} = 2, \tilde{k}_{11} = 4.$$

Обнаруженный при указанных параметрах сингулярный предельный цикл может являться предметом исследований в рамках теории Фейгенбаума-Шарковского-Магницкого (ФШМ) [1,2]. В частности, *сингулярным* предельным циклом в теории ФШМ является устойчивый предельный цикл, обладающий комплексными, но не комплексно сопряженными показателями Флоке, который при бифуркации становится сингулярным седловым циклом, порождая при этом устойчивый цикл удвоенного периода, лежащий на листе Мёбиуса вокруг исходного сингулярного цикла. Исходному сингулярному циклу трехмерной автономной системы соответствует нулевая особая точка типа *ротор* двумерной неавтономной системы с периодическими коэффициентами, координаты которой вращаются вместе с траекторией исходного цикла трансверсально ему [2].

Было установлено, что при росте положительных значений параметра $\tilde{k}_5$ при фиксированном значении остальных параметров системы сначала реализуется каскад бифуркаций Фейгенбаума удвоения периода устойчивого предельного цикла, субгармонический каскад бифуркаций рождения устойчивых циклов любого периода в соответствии с порядком Шарковского, а затем гомоклинический каскад.

На рис. 1 в каждом ряду приведены: фазовая траектория в трехмерном пространстве (x, y, z) ; ее проекция $y(x)$; временной ряд, где $x(t)$ обозначен сплошной линией, $y(t)$ штриховой, а $z(t)$ – точками. Первые три ряда отражают этапы каскада Фейгенбаума (простой сингулярный предельный цикл при $\tilde{k}_5 = 0,6$; цикл удвоенного периода при $\tilde{k}_5 = 1,8$; сингулярный аттрактор при $\tilde{k}_5 = 2,44$), а последние три – гомоклинического каскада Магницкого. Так, в четвертом ряду представлен цикл периода 5 гомоклинического каскада ($\tilde{k}_5 = 3,2$), затем – цикл периода 6 ($\tilde{k}_5 = 3,825$) и хаотический режим при $\tilde{k}_5 = 3,95$. С точки зрения теории ФШМ найденные в модели регулярные и нерегулярные аттракторы представляют собой траектории, наблюдаемые в результате каскада бифуркаций удвоения периода, субгармонического и гомоклинического каскадов.

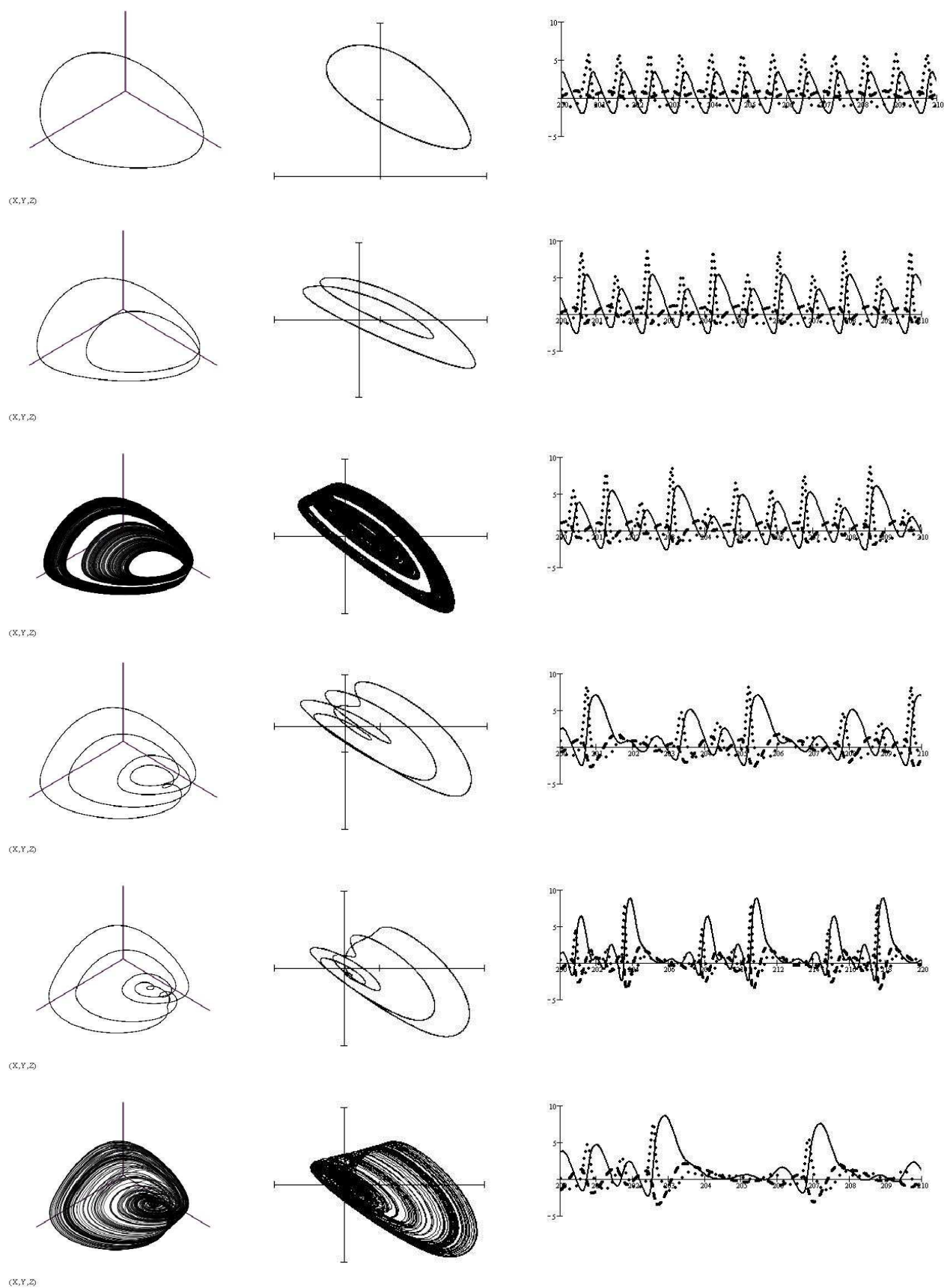


Рис. 1 Аттракторы модели (1)-(3)

Модель 2. Рассмотрим вариант модели логистической системы (ЛС), которая в работе [6] была описана следующими переменными: x – число автомобилей в текущий момент времени, участвующих в транспортном процессе; y – уровень текущих запасов на складах розничной торговли; z – уровень текущих запасов на складе оптовой торговли.

Абстрагируясь от технического смысла переменных, запишем уравнения модели следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{x} = k_1 z - k_2 yz; \\ \dot{y} = k_3 x - k_4 y - k_5 xy; \\ \dot{z} = -k_6 x - k_7 z + k_8 xy + k_9 \end{cases} \quad (7)$$

Уравнения (7) совместно с начальными условиями и заданными значениями коэффициентов позволяют сформулировать задачу Коши. Начальные условия выбирались таким образом, чтобы выполнялось соотношение:

$$x_0 \in M_d \subset M,$$

где M_d – область диссипативности системы (7), определяемая из неравенства (6) $x > -\frac{k_4 + k_7}{k_5}$.

В табл.1 приведены пять вариантов решений, для которых исследованы возникающие в них сингулярные аттракторы. В модели (7) может быть от нуля до трех особых точек. Характер их устойчивости в зависимости от параметров в настоящей работе мы не рассматриваем. Вопросы, касающиеся существования стационарных состояний, сингулярных предельных циклов и нерегулярных аттракторов, более подробно изложены в работах [6, 8].

Таблица 1

Параметры модели (7)

Вариант	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9
1	4	3	14	2	2,4	17	0,1	3	6
2	2	0,3	1	0,9	9	11,4	4	0,2	5
3	1	2	24	2	3	12	1	4	5
4	2	15	6	7	1	28	1	6	3
5	0,8	12	5	6	1	0,3	2	12	4

Модель 3. Более сложный и интересный вариант модели автономной диссипативной системы с точки зрения разнообразия решений может быть представлен в виде [3, 4, 8]:

$$\begin{cases} \dot{x} = a[(X - x) + ky - mz](Z - z) - b(Y - y)(Z - z); \\ \dot{y} = c[(Y - y) + lx + nz]z - d(X - x)z; \\ \dot{z} = ex - fy + g. \end{cases} \quad (8)$$

Здесь переменные имеют следующий смысл: x – автомобили, доставляющие груз; y – автомобили, развозящие груз; z – количество груза на складе. Параметры в уравнениях (8) обозначают: X – число автомобилей, участвующих в доставке груза; Y – число автомобилей, участвующих в развозе груза; Z – предельная (или наиболее вероятная) емкость склада; g – интенсивность восполнения груза другими видами транспорта.

Выражая систему (8) в явном виде относительно фазовых координат, получим

$$\begin{cases} \dot{x} = k_1x + k_2y + k_3z + k_4xz + k_5yz + k_6z^2 + k_7; \\ \dot{y} = k_8xz + k_9yz + k_{10}z^2 + k_{11}z; \\ \dot{z} = k_{12}x + k_{13}y + k_{14}. \end{cases} \quad (9)$$

При этом, если выбирать произвольно 14 параметров в системе (8), то из 14-ти коэффициентов в (9) независимыми будут только 12. Таким образом, система (9) представляет собой более широкое множество моделей по сравнению с (8). Отметим, что в системе (9) имеется преобразование симметрии вида:

$$x \rightarrow A - \tilde{y} + a\tilde{z}, \quad y \rightarrow \tilde{x} + \beta\tilde{z}, \quad z \rightarrow B - \tilde{z}. \quad (10)$$

Анализ модели (8) в основном выполнялся при допущении, что все параметры положительны (некоторые в частных случаях принимаются равными нулю) и не зависят от времени. Исследование систем уравнений начиналось с определения точек стационарных состояний, их типа и устойчивости.

Система (8) диссипативна, если выполнено условие (6), при этом $Z < \frac{aZ}{a-c}$, если $a > c$ и $Z > \frac{aZ}{a-c}$, если $a < c$. Следовательно, возникает предположение о возможности существования сингулярных циклов и аттракторов, а также гетероклинических контуров, определяющих вид траекторий в фазовом пространстве.

Уравнения (8) исследовались, как и ранее, численно методом Рунге-Кутты с переменным шагом и точностью $1 \cdot 10^{-6}$. Были найдены все основные виды решений, характерные для трехмерных автономных нелинейных систем: стационарное состояние, предельный цикл, странный (хаотический) аттрактор и другие типы циклов различной периодичности. Зафиксируем константы модели (8), как указано в табл.2. Результаты исследований представлены подробнее в работах [3, 4, 8]. Найденные численные

решения образуют два симметричных семейства, в полном соответствии с формулами (10).

Таблица 2

Параметры модели (8)

Вариант	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>
1	3	8	2	25	1	5	180
2	3	5	6	2	1	4	2
3	5	0,6	3	1	0,4	2	9
4	1	7	4	5	0,9	2	2,1
5	1,5	2	1	0,4	7	9	-15
6	2,1	1	4	0,7	0,1	4	0,1
7	1	0,5	2,8	5,5	0,5	2	3
8	2	1	0,5	4	2,11	7	5
Вариант	<i>k</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
1	0,2	4	1,7	10	50	20	150
2	3	2	1	3	4	5	1
3	7	0,7	4	2	1	0,5	2
4	0,3	6	0,1	2	5	10	0,4
5	0,1	5	2	4	1	2	1
6	2	1	9	3	2	1	4
7	1	0,4	9	0,4	0,1	2	5
8	0,5	2	1	9	0,6	3	2

В табл.2 (вариант 5) приведен случай, который свидетельствует о существовании в модели (8) так называемых «контрастных структур» и пограничного слоя [10]. Данный вариант пригоден для описания эффектов типа «жесткой турбулентности» без привлечения аппарата «русел и джокеров». Зависимость $z(t)$ в этом варианте весьма напоминает некоторую стратегию управления запасами, что придает модели (8) практическую

привлекательность. Подобные аттракторы названы в работе [5] *контрастными*. На рис. 2 приведены результаты расчетов для модели (8) при некоторых других значениях параметров, дополняющие представление о разнообразии имеющихся в мультиаттракторной системе (8) решениях. Практически все эти решения проверены на возможность синхронизации генераторов в системах скрытой передачи информации [9].

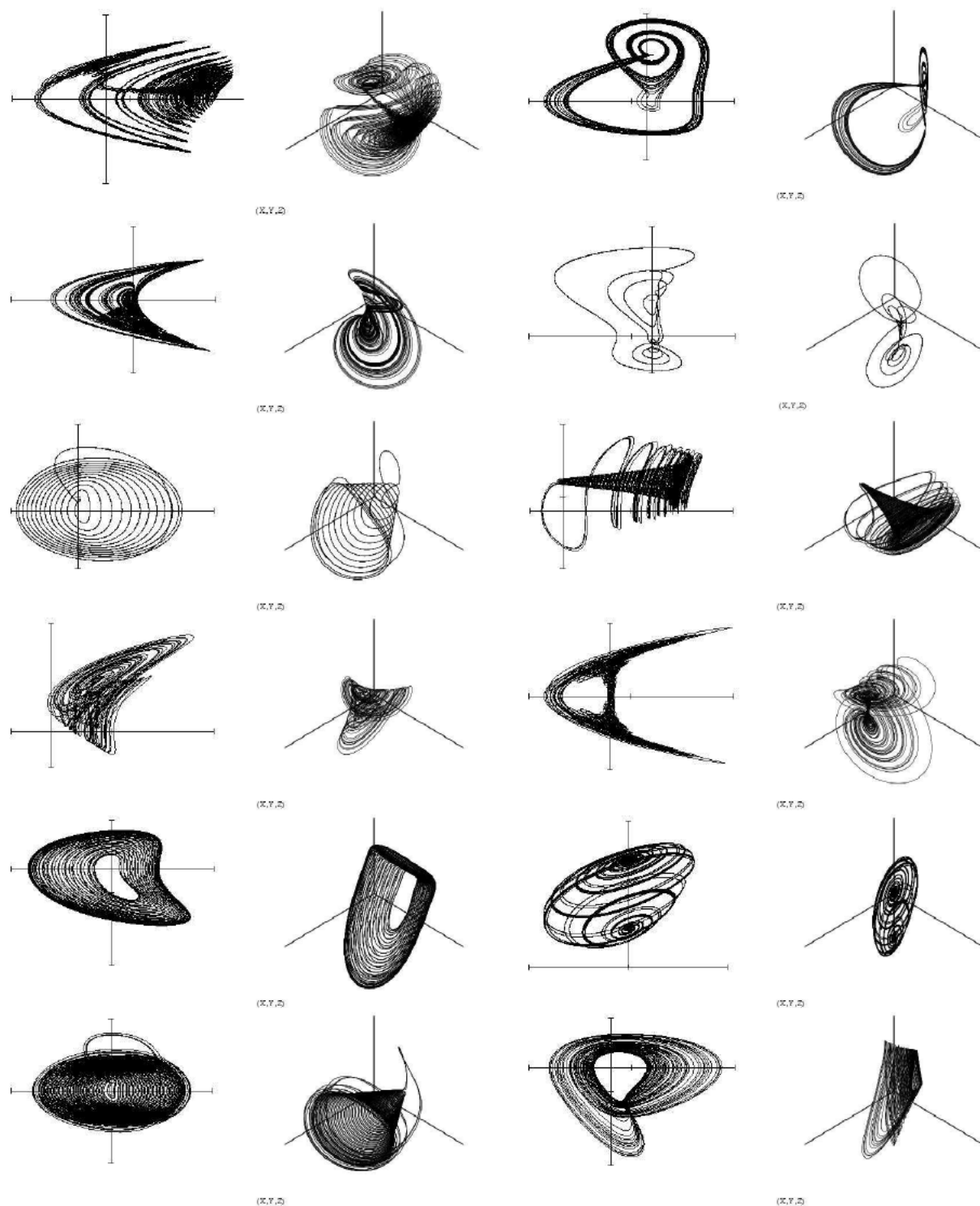


Рис. 2 Аттракторы модели (8)

В каждом ряду на рис.2 показано по два различных решения. Приведены проекция фазовой траектории $z(y)$, а также трехмерный фазовый портрет каждого решения. Главным образом, представлены сложные сингулярные циклы и аттракторы, возникающие здесь при наличии различных гетероклинических контуров. Анализ каждого отдельного случая является довольно громоздким и может быть предметом более широкой публикации. В то же время, большинство из представленных здесь вариантов относится, по нашему мнению, к контрастным аттракторам, отличающимся наличием быстрых и медленных участков для каждой фазовой переменной (так называемые «всплески» и «скачки» [10]). Особенный интерес представляют два варианта из предпоследнего ряда. Здесь показан квазипериодический аттрактор и «шаровой» (точнее, эллипсоидный) аттрактор. В рассматриваемой системе существует не единственный вариант, когда фазовые переменные образуют траекторию, принадлежащую двумерному инвариантному тору. На временных зависимостях четко проявляется наличие двух частот, образующих рациональное отношение. Шаровой (эллипсоидный аттрактор) имеется не только в системе [8]. Опубликованы данные, свидетельствующие, что такие аттракторы есть и в других системах ОДУ [11]. На наш взгляд, существование такого аттрактора связано с проблемой некорректности решаемой при соответствующих значениях параметров задачи Коши.

Заключение. Результаты выполненных исследований диссипативных систем обыкновенных дифференциальных уравнений показывают, что универсальным способом, который можно рассматривать как сценарий перехода к хаотическому поведению, является каскад бифуркаций удвоения периода Фейгенбаума, субгармонический каскад в соответствие с порядком Шарковского и далее гомоклинический каскад Магницкого (теория ФШМ).

Среди полученных решений достаточно много таких, которые вполне могут использоваться в качестве модельных систем для описания эффектов типа «жесткой турбулентности» без привлечения аппарата «русел и джокеров». В некоторых моделях (например, модель 3) обнаруживаются некоторые признаки «периодичности» получаемых решений (паттернов поведения). Это означает, что аттракторы образуют последовательности топологически разных, но связанных между собой решений, которые иногда составляют симметричные группы. В различных по структуре правых частей системах могут получаться топологически одинаковые решения (например, типа аттрактора Лоренца в модели 2, Ресслера в модели 3 или других более сложных).

Рассмотренные модели могут быть использованы в качестве базовых для теоретического исследования работы систем скрытой передачи информации.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундамен-

тальных исследований (проект № 13-08-01359).

Список литературы

1. Магницкий Н. А., Сидоров С. В. Новые методы хаотической динамики. М.: Эдиториал УРСС, 2004. 320 с.
2. Магницкий Н. А. Теория динамического хаоса. М.: Изд-во URSS (ЛЕНАНД), 2011. 320 с.
3. Агуреев И. Е. Нелинейная динамика в теории автомобильных транспортных систем // Изв. ТулГУ. «Автомобильный транспорт». Вып. 9. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. С.3-13.
4. Агуреев И. Е. Нелинейные модели транспортных процессов и систем // Изв. ТулГУ. Сер. «Автомобильный транспорт». Вып. 10. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. С.3-11.
5. Агуреев И. Е. Применение теории Фейгенбаума-Шарковского-Магницкого для анализа модели конкуренции двух автомобильных перевозчиков // Труды Института системного анализа Российской академии наук. Динамика неоднородных систем / под ред. С. В. Емельянова. Т. 33. Вып. 12. М.: Издательство ЛКИ, 2008. С. 159-175.
6. Агуреев И. Е., Тропина В. М. Динамика логистической системы в транспортных цепях поставок // Изв. ТулГУ. Техн. науки. Вып.4, 2011. С.158-167.
7. Агуреев И. Е., Богма А. Е., Пышный В. А. Динамическая модель транспортной макросистемы // Изв. ТулГУ. Техн. науки. Вып.6. Ч.2, 2013. С.139-145.
8. Агуреев И. Е., Атлас Е. Е. Хаотическая динамика в системах транспорта // Сложность. Разум. Постнеклассика. Сургут-Тула-Ханновер-Вашингтон. 2012. №1. С.95-107.
9. Агуреев И. Е., Агуреев К. И. Численный анализ процессов скрытой передачи информации на основе мультиаттракторной системы // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. № 10. С. 169-177.
10. Неймарк Ю. И., Смирнова В. Н. Контрастные структуры, предельная динамика и парадокс Пэнлеве // Дифференциальные уравнения. 2001. Т.37. № 11. С.1507-1515.
11. Wang Z., Sun Y., Cang S. A 3-D spherical chaotic attractor // Acta Physica Polonica B. Vol. 42. No.2. 2011. P.235-247.

Агуреев Игорь Евгеньевич, д-р техн. наук, декан факультета транспортных и технологических систем, agureev-igor@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Агуреев Константин Игоревич, аспирант, clickhere@bk.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Гладышев Александр Владимирович, аспирант, glav-alex@mail.ru, Тула, Тульский государственный университет

THE SEQUENCES OF SINGULAR ATTRACTORS IN SOME AUTONOMOUS DISSIPATIVE
MULTYATTRACTOR SYSTEMS

I.E. Agureev, K.I. Agureev, A.V. Gladyshev

Some autonomous dissipative systems of ordinary differential equations used for the forming secure communication systems on their basis are considered. The sequences of existing in the systems singular attractors are built and given to justification of their multiattractor character. The preliminary analysis of their bifurcation behavior, corresponding to the modern ideas of dynamical chaos theory (Feigenbaum-Sharkovskii-Magnitskii's theory), are done.

Key words: nonlinear dissipative system, non-regular attractor, chaotic synchronization, secure communications

Agureev Igor Evgenjevich, doctor of technical science, dean of faculty of transportation and technological systems, agureev-igor@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Agureev Konstantin Igorevich, postgraduate, clickhere@bk.ru, Russia, Tula, Tula State University

Gladyshev Alexandr Vladimirovich, postgraduate, glav-alex@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.436

РАСЧЕТЫ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ В ГАЗОВОМ ДВИГАТЕЛЕ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРАКТИВНОЙ ПРОГРАММЫ GAS2-DWS

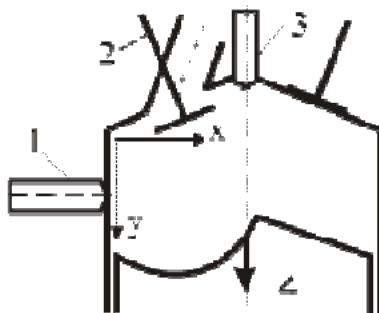
В.А. Дунаев, С.А.Чесноков, Ле Дай Лам, С.Э. Лукин

Рассмотрены особенности применения интерактивной программы типа GAS2 для решения тестовых задач турбулентной газодинамики при расчетах рабочих процессов газовых двигателей внутреннего сгорания.

Ключевые слова: газовый двигатель, турбулентная газодинамика, коэффициент избытка воздуха, интерактивная программа решения на ЭВМ.

Во многих случаях при проектировании двигателей внутреннего сгорания (ДВС) необходимы расчеты множества вариантов двигателя с целью определения наиболее выгодного расположения основных элементов: форсунки, свечи зажигания, клапанов и т.п. Использование для этого больших трехмерных программ газодинамики и горения (как правило, зарубежных) требует огромных затрат машинного времени и нецелесообразно. Программы двумерных задач турбулентной газодинамики и химической кинетики горения позволяют на порядок быстрее получить тестовые решения, отвечающие на конкретные вопросы выбора элементов конструкции.

Ниже рассмотрено применение двумерной интерактивной программы GAS2-DWS, разработанной на основе программы GAS2 [1]. В качестве объекта исследования выбран двигатель легкового автомобиля типа Mitsubishi Galant, конвертированный для газового топлива. Геометрия поршня и цилиндра ДВС изображена на рис. 1.



**Рис. 1. Схема цилиндра: 1 – газовая форсунка; 2 – впускной клапан;
3 – свеча зажигания; 4 – поршень**

Основные параметры двигателя: горючее – природный газ (метан); рабочий объем цилиндра – $0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; его диаметр – 0,08 м; степень сжатия – 12; номинальные обороты коленчатого вала – 3000 об/мин; средний коэффициент избытка воздуха в камере сгорания – 1,5; измеренное в экспериментах время горения – 1,2 мс.

1. Математическое описание задачи

Для двухмерной газодинамической задачи математическое описание выглядит следующим образом:

– уравнение неразрывности

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) = 0, \quad \forall x, y \in S_0, t > 0;$$

$$\rho \frac{\partial c_k}{\partial t} + \rho U \frac{\partial c_k}{\partial x} + \rho V \frac{\partial c_k}{\partial y} = J_i - \left(\frac{\partial m_{Dkx}}{\partial x} + \frac{\partial m_{Dky}}{\partial y} \right), \quad \sum_k c_k = 1;$$

– уравнения движения

$$\rho \frac{dU}{dt} = \rho F_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \left[\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial y} \right] - \sum_k \left[\frac{\partial m_{Dkx} u}{\partial x} + \frac{\partial m_{Dkx} v}{\partial y} \right],$$

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho F_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \left[\frac{\partial \tau}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \right] - \sum_k \left[\frac{\partial m_{Dky} u}{\partial x} + \frac{\partial m_{Dky} v}{\partial y} \right],$$

$$\forall x, y \in S_0, t > 0;$$

– уравнение энергии

$$\begin{aligned} \rho \frac{dE}{dt} = & \rho (F_x U + F_y V) - \left(\frac{\partial P U}{\partial x} + \frac{\partial P V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (\sigma_x U + \tau V) + \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (\tau U + \sigma_y V) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \sum_k \rho c_i (F_{kx} U_{Dk} + F_{ky} V_{Dk}) + \\ & + \sum_k \left[\frac{\partial}{\partial x} (\sigma_x U_{Dk} + \tau V_{Dk}) + \frac{\partial}{\partial y} (\tau U_{Dk} + \sigma_y V_{Dk}) \right] - \\ & - \sum_k \left(\frac{\partial \rho c_k E_k U_{Dk}}{\partial x} + \frac{\partial \rho c_k E_k V_{Dk}}{\partial y} \right), \quad \forall x, y \in S_0, t > 0; \end{aligned}$$

– уравнение состояния

$$P = \rho R T,$$

где U, V – соответственно, составляющие скорости по осям x и y ; формулы для напряжений вязкости имеют вид:

$$\sigma_x = \frac{2}{3} \mu \left[2 \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\partial V}{\partial y} \right]; \quad \sigma_y = \frac{2}{3} \mu \left[2 \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{\partial U}{\partial x} \right];$$

$$\tau = \mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right).$$

Соотношения k - ε модели турбулентности запишем в виде [2]:

– уравнение для кинетической энергии турбулентности k

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \text{div}(\rho k \vec{W}) = D_e + P_e - \Phi_e;$$

– уравнение для скорости диссипации этой энергии ε

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \vec{W}) = D_\varepsilon + P_\varepsilon - \Phi_\varepsilon;$$

– коэффициенты переноса определяются выражениями

$$\mu_T = c_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon}; \quad \lambda_T = \frac{c_p \mu_T}{Pr_T}; \quad D_T = \frac{\mu_T}{\rho Sc_T},$$

$$\mu = \mu_M + \mu_T; \quad \lambda = \lambda_M + \lambda_T; \quad D = D_M + D_T,$$

где $\mu_M, \mu_T, \lambda_M, \lambda_T, D_M, D_T$ – коэффициенты молекулярной и турбулентной вязкости, теплопроводности и диффузии; $c_\mu, c_{1\varepsilon}, c_{2\varepsilon}, c_{3\varepsilon}, \sigma_e, \sigma_\varepsilon$ – эмпирические константы модели; Pr_T, Sc_T – турбулентные числа Прандтля и Шмидта; диффузионные составляющие D_e и D_ε имеют вид

$$D_e = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_e} + \mu \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right]; \quad D_\varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_e} + \mu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right];$$

генерация величин k и ε определяется соотношениями

$$P_e = \mu_T \left(\frac{\partial W_i}{\partial x_j} + \frac{\partial W_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial W_i}{\partial x_j}, \quad P_\varepsilon = c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{e} P_e;$$

вязкая диссипация – формулами $\Phi_e = c_{1\varepsilon} \rho k$, $\Phi_\varepsilon = c_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$.

Параметры, характерные для рассматриваемых течений, представлены в таблице.

Значения чисел Pr_T, Sc_T и эмпирических констант

Pr_T	Sh_T	c_μ	$c_{1\varepsilon}$	$c_{2\varepsilon}$	$c_{3\varepsilon}$	σ_e	σ_ε
0,85	1	0,09	1,44	1,92	0,8	1,0	1,3

2. Общее описание метода решения

Для расчета таких течений применяется численный метод, использующий схемы расщепления метода крупных частиц [3], но реализованный на неравномерной сетке метода конечных элементов. Использование нерегулярной сетки позволяет более точно аппроксимировать криволинейные границы областей сложной формы, реализовать неравномерную дискретизацию области потока.

При рассмотрении особенностей данного метода вводится понятие конечной частицы, отражающее использование в своей основе указанных

методов. Внутри конечной частицы параметры потока аппроксимируются алгебраическими функциями с использованием известных соотношений метода конечных элементов.

Выбор расчетной схемы области наряду с выбором вида объекта геометрической идеализации и моделей физической идеализации процессов, включает в себя также выбор формы фрагмента дискретизации. В зависимости от степени сложности процесса и геометрии области, фрагмент дискретизации может представлять собой элемент различной формы, например, в двухмерных задачах, треугольной с тремя или шестью узлами или четырехугольной.

Работа с программой GAS2-DWS включает в себя: построение поля решения в контуре цилиндра, задание законов движения поршня и впускного клапана, выделение границ с условиями втекания (вытекания) газа и задание числовых исходных данных.

Целью решения газодинамической задачи является конечное (в конце сжатия) поле коэффициента избытка воздуха в камере сгорания.

3. Результаты решения

Геометрия цилиндра и поршня соответствуют двигателю GDI Mitsubishi Galant. В качестве исходных данных приняты следующие физические характеристики воздуха / метана:

- газовая постоянная: 297 / 520 Дж/кг К;
- молекулярный коэффициент вязкости: $20 \cdot 10^{-6} / 10 \cdot 10^{-6}$ м²/с;
- молекулярный коэффициент теплопроводности: 0,023/0,033 Вт/м К;
- турбулентный коэффициент вязкости смеси $\sim (2...90) 10^{-4}$ м²/с в рамках k - ϵ модели турбулентности.

Поля скорости при всасывании воздуха, изображенные на рис. 2, одинаковы для всех вариантов расположения форсунки, рассмотренных ниже (точка зажигания отмечена буквой S). Впускной канал имеет входной конус, обеспечивающий безотрывное втекание воздуха.

Характерной особенностью поля скорости является образование за открытым клапаном двух вихревых зон А и В, причем из-за особенностей геометрии камеры сгорания правая струя 2 представляет собой плотную пристенную струю большей мощности, чем быстро расширяющаяся левая струя 1. Поясним это следующим образом. При движении поршня вниз, справа от клапана, освобождается больший объем цилиндра, поэтому скорость всасываемой струи воздуха выше, чем слева, а изгибающаяся вниз верхняя поверхность КС не позволяет расширяться пристенной струе 2. Этот эффект сохраняется до конца всасывания.

Результаты расчетов смесеобразования при впрыске горючего (метан) получены для различного расположения газовой форсунки: верхнего (рис. 3), нижнего (рис. 4) и левого (рис. 5). Впрыск производится в конце

такта всасывания в течение 2 мс. Такой впрыск, в период низкого давления при всасывании, позволяет повысить степень наполнения цилиндра. Треугольный импульс скорости впрыска достигает в максимуме 170 м/с. Масса впрыскиваемого горючего обеспечивает среднее значение коэффициента избытка воздуха в цилиндре $\alpha_{\text{ср}} = 1,5$.

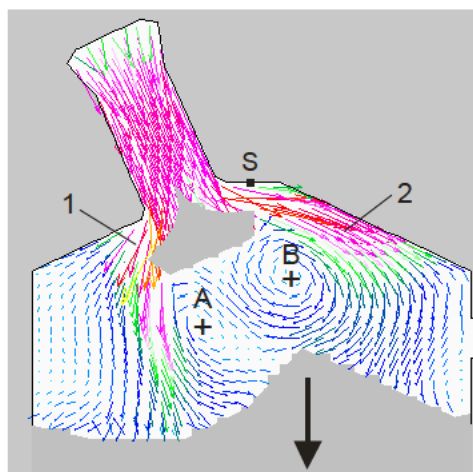


Рис. 2 Поля скорости в начале всасывания (60° пкв)

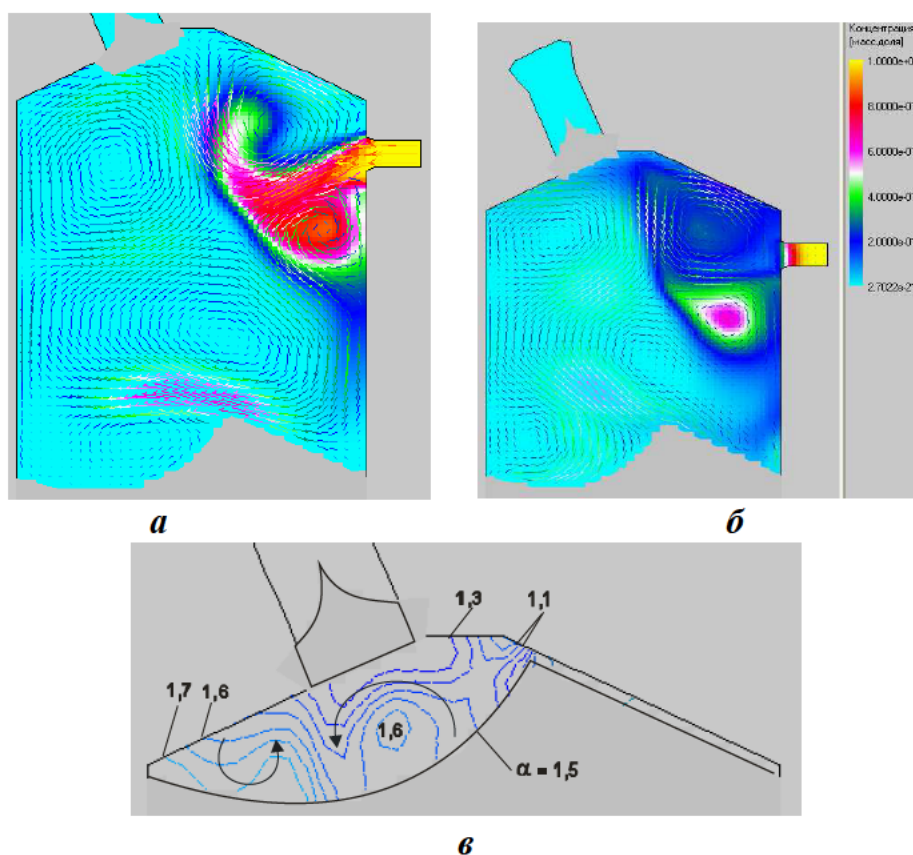


Рис. 3. Верхнее расположение форсунки. Поля скорости и концентрации горючего для начала впрыска (а), его конца (б), а также конечное поле коэффициента избытка воздуха α в камере сгорания (в)

Ниже рассматривается только боковые расположения форсунки, т.к. в этом случае она закрывается поршнем на время горения и защищена от продуктов сгорания.

1. При верхнем положении форсунки (рис. 3) пристенная струя воздуха 2 препятствует распространению струи метана и масса горючего накапливается в правой части цилиндра. В конце сжатия, т.е. в объеме камеры сгорания (рис. 3, в), это создает сильно неоднородное поле коэффициента избытка воздуха α горючей смеси, с неоднородностью $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min} \approx 0,6$ и слабой двух вихревой конвекцией.

2. Нижнее расположение форсунки (рис. 4) определяет попутное движение струй воздуха и метана при впрыске. Это обеспечивает быстрое заполнение горючим средней части цилиндра, с последующей конвекцией вверх, в пределах большого правого вихря, причем его мощность усиливается попутной струей метана. В конце сжатия (рис. 4, в) неоднородность поля избытка воздуха значительно меньше, чем в случае верхней форсунки, $\Delta\alpha \approx 0,4$.

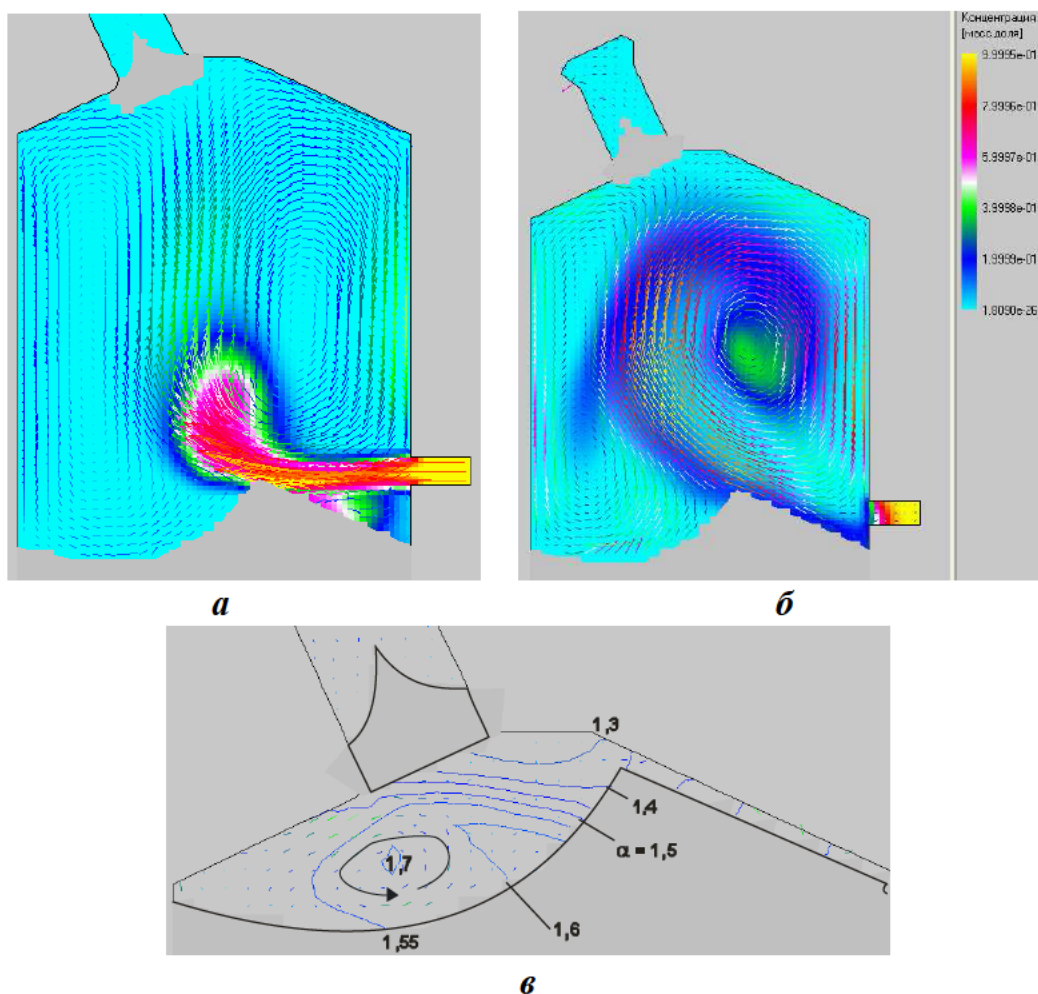


Рис .4. Нижнее расположение форсунки. Поля скорости и концентрации горючего для начала впрыска (а), его конца (б), а также конечное поле коэффициента избытка воздуха α в камере сгорания (в)

3. При средней по высоте форсунке, установленной слева (рис. 5), струя метана легко пробивает слабую циркуляцию воздуха у левой стенки и практически достигает противоположной поверхности цилиндра. Полость цилиндра заполняется метаном более равномерно, чем в предыдущих вариантах. Конечное поле α в конце сжатия (рис. 5, в) является слабо неоднородным ($\Delta\alpha \approx 0,3$).

Для всех вариантов расположения форсунки характерно наличие относительно богатой горючим смеси вблизи форсунки ($\alpha \approx 1,3$), что облегчает воспламенение. В то же время рельеф полей α вдали от свечи существенно различается. Давление в конце сжатия составляет около 3 МПа (30 атм).

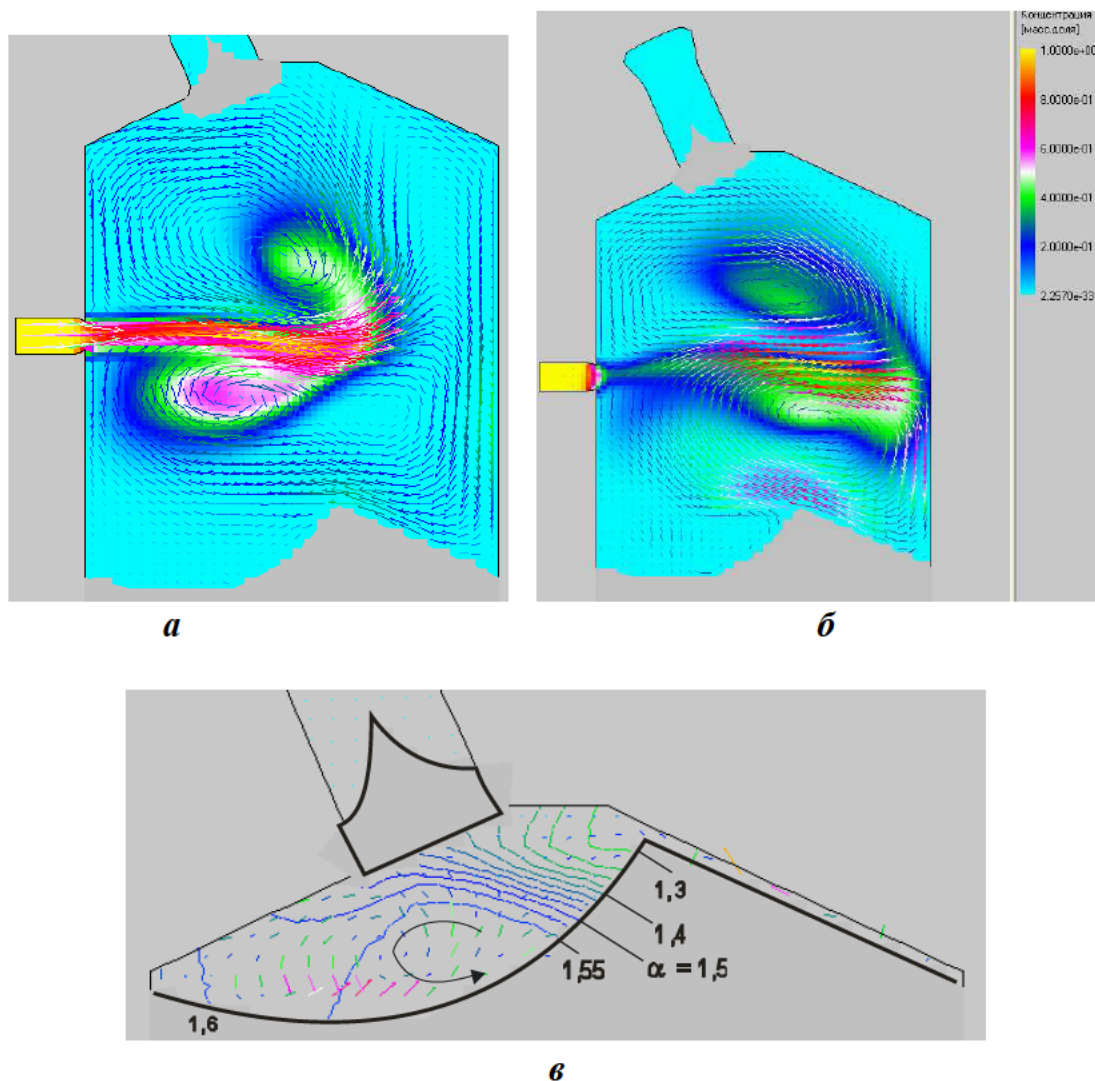


Рис. 5. Левое расположение форсунки. Поля скорости и концентрации горючего для начала впрыска (а), его конца (б), а также конечное поле коэффициента избытка воздуха α в камере сгорания (в)

Полученные поля коэффициента избытка воздуха позволяют перейти к решению задачи горения.

Список литературы

1. Чесноков С.А., Дунаев В.А. Тепломассообмен и горение в автомобильных двигателях. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. 400 с.
2. Рейнольдс А. Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях. М.: Энергия, 1979. 408 с.
3. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982. 370 с.

Дунаев Валерий Александрович, д-р техн. наук, проф., sachesn45@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Чесноков Сергей Александрович, д-р техн. наук, проф., sachesn45@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ле Дай Лам, аспирант, sachesn45@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Лукин Сергей Эдуардович, магистр, нач. отдела программного обеспечения, sachesn45@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

**CALCULATION OF MIXTURE FORMATION IN GAS ENGINES USING
THE WEB GAS2-DWS**

V.A. Dounaev, S.A.Chesnokov, Le Dai Lam, S.E. Lukin

The features of an interactive application programs such GAS2 solutions for test problems in the calculation of turbulent gas dynamics of a gas of internal combustion engines.

Key words: gas engine, turbulent gas dynamics, excess air ratio, an interactive software solutions for the computer.

Dunaev Valerij Aleksandrovich, doctor of technical sciences, professor, sachesn45@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Chesnokov Sergej Aleksandrovich, doctor of technical sciences, professor, sachesn45@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Le Dai Lam, postgraduate, sachesn45@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Lukin Sergej Jeduardovich, magistr, sachesn45@mail.ru, Russian, Tula, Tula State University

РАСЧЕТЫ ГОРЕНИЯ И РАСШИРЕНИЯ В ГАЗОВОМ ДВИГАТЕЛЕ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРАКТИВНОЙ ПРОГРАММЫ GAS2-DWS

С.А.Чесноков, Ле Дай Лам, С.Э. Лукин

Рассмотрены особенности применения интерактивной программы типа GAS2 для решения тестовых задач при расчетах горения и расширения в газовых двигателях внутреннего сгорания. Получены результаты по содержанию токсичных компонентов.

Ключевые слова: газовый двигатель, коэффициент избытка воздуха, горение и догорание, интерактивная программа решения на ЭВМ.

В предыдущей статье получены поля коэффициента избытка воздуха в камере сгорания (КС) с помощью которых можно рассчитать процесс горения - поля температур и содержания компонентов продуктов сгорания, включая токсичные оксиды NO и CO. Двухмерная постановка задач позволяет на порядок быстрее, чем в трехмерных задачах, получить тестовые решения, отвечающие на конкретные вопросы выбора и расположения элементов конструкции.

Ниже рассмотрено применение двухмерной интерактивной программы GAS2-DWS, разработанной на основе программы GAS2 [1]. В качестве объекта исследования выбран двигатель легкового автомобиля типа Mitsubishi Galant GDI, конвертированный для газового топлива.

Основные параметры двигателя: горючее – природный газ (метан); рабочий объем цилиндра - $0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; его диаметр – 0,08 м; степень сжатия – 12; номинальные обороты коленчатого вала – 3000 об/мин; средний коэффициент избытка воздуха в камере сгорания – 1,5; измеренное в экспериментах время горения – 1,2 мс.

1. Расчеты горения в камере сгорания

Расчеты горения в ДВС на уровне задач тепломассообмена позволяют получить не только параметры рабочего процесса двигателя – давление, температуру, плотность газа в цилиндре, но и более глубокую информацию: турбулентные поля скорости и концентрации компонентов смеси при горении и расширении, в том числе поля токсичных компонентов – оксидов углерода и азота.

При моделировании горения топлив в камере сгорания (КС) ключевое значение имеет значение турбулентной скорости горения $u_T = l / \tau_T$, где l - путь фронта горения; τ_T - время горения. Для двигателя GDI $l = 0,05$

м. Время горения определялось при спектрометрии ДВС [2] по продолжительности излучения радикала ОН: $\tau_T = 1,2 \text{ мс}$ для $n = 3000 \text{ об/мин}$. Таким образом, средняя турбулентная скорость горения составляет $u_T \sim 40 \text{ м/с}$.

Помимо выгорания топливной смеси движение фронта F (рис. 1) зависит от температурного расширения зоны продуктов сгорания 1, поскольку ее температура значительно выше, чем горючей смеси 2. Это приводит к ускорению движения фронта, особенно в начале горения, когда объем сжимаемой свежей горючей смеси еще велик и противодействие ее давления мало. Расчеты движения фронта в монографии [3] показывают, что его суммарная скорость u_F меняется от ~ 60 до $\sim 30 \text{ м/с}$. В программе эта зависимость задается линейной.

Если рассматривать движение потоков относительно фронта горения, то набегающий на фронт поток свежей горючей смеси имеет скорость u_T , а скорость оттока горячих продуктов от фронта V_{OT} в несколько раз больше из-за температурного расширения. Отток продуктов формирует турбулентное поле скорости в зоне 1, где наблюдается догорание перемешивающихся струй с преобладанием горючих компонентов, например, оксида СО, и струй с избытком кислорода O_2 , а также его радикалов О, ОН и т.п.

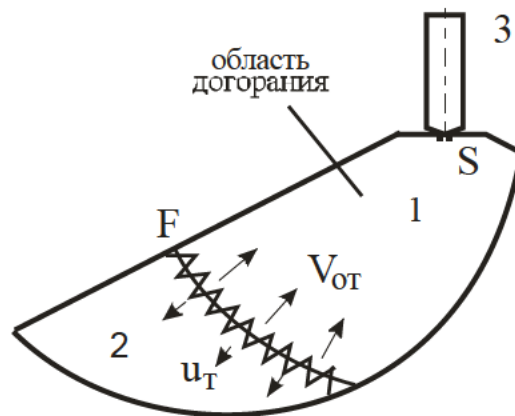


Рис. 1. Камера сгорания двигателя GDI Mitsubishi Galant:
1 – продукты горения; 2 – горючая смесь; F – фронт горения;
3 – электросвеча

При этом токсичный оксид СО превращается в безвредный углекислый газ CO_2 , кроме того, при высоких температурах развивается сравнительно медленный процесс окисления азота воздуха с образованием токсичного оксида NO. Процесс турбулентного конвективно-диффузионного перемешивания продуктов оттока и происходящих при этом химических

реакций догорания назван химическим турбулентным тепломассообменом (ХТТ) и детально описан в работе [3].

По мере движения фронта в неоднородном поле коэффициента избытка воздуха α камеры сгорания местные значения скорости горения, скорости оттока, температуры горения (фронта) и состав продуктов горения (зависящие от α) изменяются. В монографии [3] показано, что при неоднородности поля избытка воздуха $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min} \leq 0,3$ геометрия фронта близка к сферической. Отметим, что скорость оттока достигает 50...100 м/с, поэтому будем считать, что циркуляция горючей смеси перед зажиганием (со скоростью ~ 10 м/с) не влияет на поле скорости образовавшихся продуктов сгорания в зоне 1.

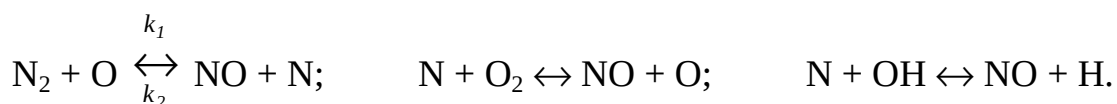
В исходных данных программы GAS2-DWS скорость движения фронта, скорости оттока и температура фронта задаются в виде кусочно-линейных аппроксимаций во времени процесса горения по данным [3].

Рассмотрим особенности химических реакций горения. Внутри фронта, при быстром горении, текущий состав смеси является существенно неравновесным. Это требует решения громоздких задач химической кинетики горения.

На выходе фронта, при высокой температуре горения (до 3000 К) состав продуктов сгорания устанавливается равновесным.

За фронтом, при турбулентном перемешивании струй оттока различного состава (горючих и окисляющих) и более низких температурах, инициируются лишь медленные реакции догорания, приводящие к постепенной перестройке равновесного состояния в каждой точке КС («дрейф равновесия»). Исключением являются очень медленные и поэтому не уравновешенные реакции образования токсичного оксида NO из инертного газа – азота воздуха.

В настоящее время общепринятым является кинетический механизм образования оксида NO акад. Зельдовича:



Анализ результатов кинетических расчетов в монографии [3] показал, что основными, активно реагирующими компонентами, являются радикалы O и OH. Поэтому в дальнейшем анализируются поля NO, CO, O, OH.

Равновесные концентрации (доли) любого компонента (радикала) определяются температурой, давлением и коэффициентом избытка воздуха. Они легко вычисляются по известным типовым программам.

Поля компонентов продуктов сгорания формируются под влиянием

температуры, конвективного переноса и турбулентной диффузии. Радикалы, в отличие от молекул, образуются и исчезают в очень быстрых реакциях, скорость которых сильно зависит от температуры. Поэтому их локальное содержание определяется, в основном, температурой, а не конвективным переносом или диффузией.

Для тестового решения выберем вариант расположения газовой форсунки со стороны впускного клапана. В этом случае поле коэффициента избытка воздуха α перед зажиганием является слабо неоднородным и, в первом приближении, будем считать его однородным при среднем значении $\alpha_{\text{ср}} = 1,4$.

В итоге, из трех параметров, определяющих равновесный состав радикалов: температуры, давления и коэффициента избытка воздуха, необходимо учитывать нестационарное поле температур и изменяющееся давление в цилиндре при постоянном $\alpha_{\text{ср}}$. Поэтому, получаемые с помощью программы GAS2 линии одинаковых температур (изотермы), прямым образом отражают рельеф полей содержания радикалов. Более того, каждая изотерма является одновременно изолинией равновесной доли содержания любого компонента (кроме NO). Эти изолинии в дальнейшем будем называть изодолями (массовыми или мольными).

Неравновесное изменение доли оксида азота x_{NO} потребовало расчета кинетики NO для характерных точек КС по формуле Звонова В.А.:

$$\frac{x_{\text{NO}}}{d\tau} = 2k_1 N_2 O \left(1 - \left(\frac{x_{\text{NO}}}{\text{NO}} \right)^2 \right).$$

Здесь: τ - время; k_1 – константа скорости ведущей реакции; N_2 , O , NO – равновесные доли компонентов. В качестве начального условия задано нулевое значение доли x_{NO} на выходе фронта.

При температурах < 2400 К реакции образования и распада оксида NO замедляются настолько, что его доля остается неизменной – «замораживается». Аналогичный эффект наблюдается при догорании CO – его содержание «замораживается», если температура падает ниже 1500 К (в выпускной магистрали).

На рис. 2 представлены турбулентные поля скорости за фронтом пламени, в зоне продуктов сгорания. При расчетах, по данным монографии [3], считались заданными сферическая форма «средней линии» турбулентного фронта, скорость его движения, а также скорости, температуры и плотности струй оттока. В верхней части КС формируется вихревая зона с вращением против часовой стрелки, что обусловлено преобладающим влиянием струи оттока участка 1 фронта.

На рис. 3 приведены изотермы поля температур и совпадающие с ними изолинии молярных долей равновесного содержания радикалов (изодоли). При давлении свежей смеси перед зажиганием ~ 3 МПа в конце горения давление составляет ~ 7 МПа.

Значения молярных долей радикалов, указанные под рисунками, рассчитаны как равновесные для температуры изотермы, текущего давления в КС и среднего коэффициента избытка воздуха в объеме КС. Результаты этих расчетов для середины периода горения являются приближенными, так как перемешивание неоднородной по избытку воздуха смеси еще не закончено и использовать средний коэффициент избытка воздуха для всех точек поля решения не правомерно.

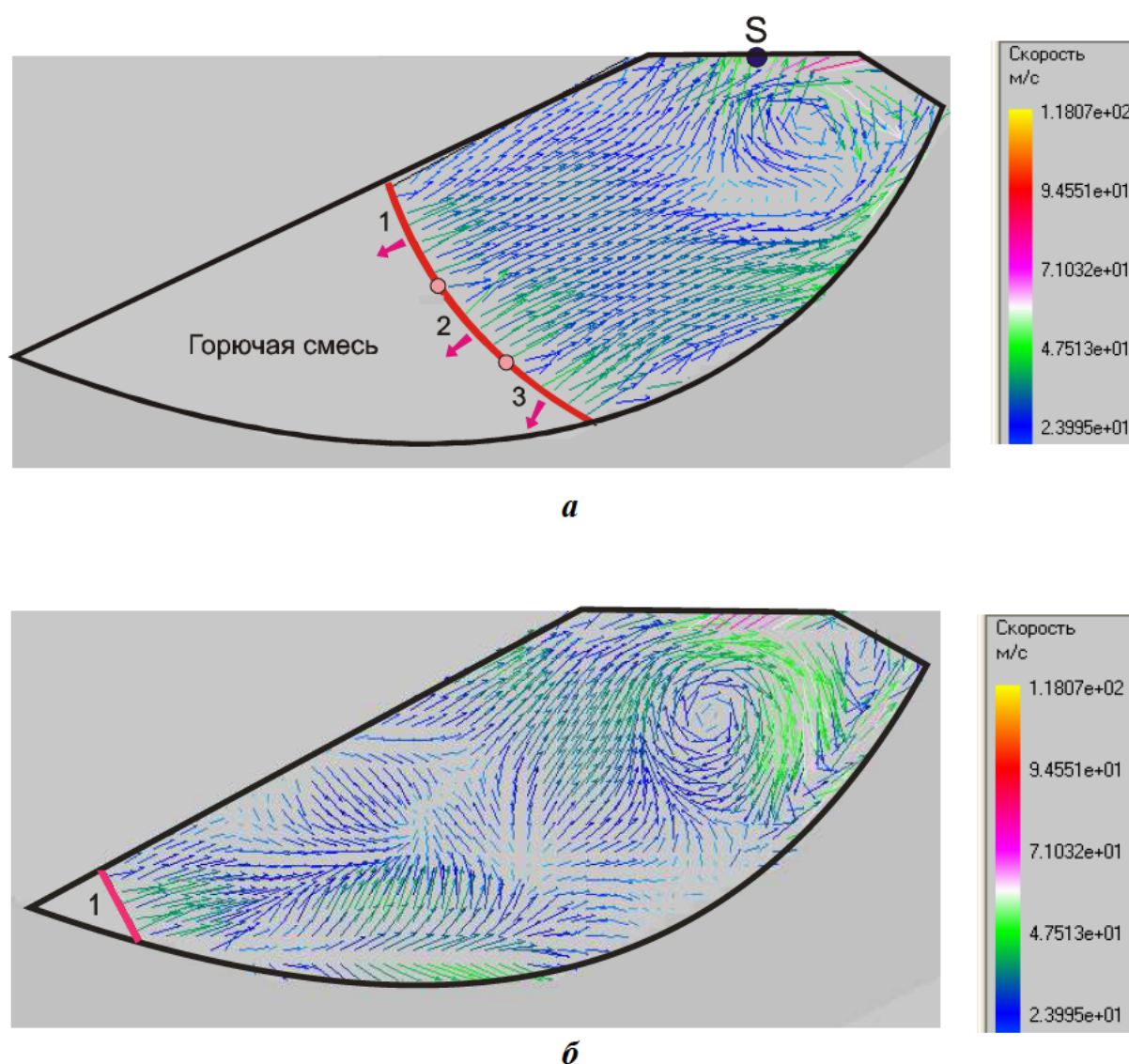
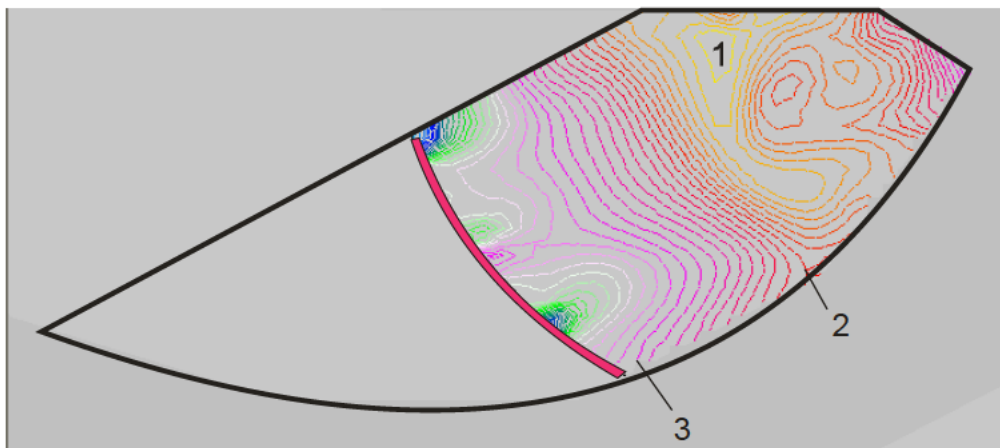
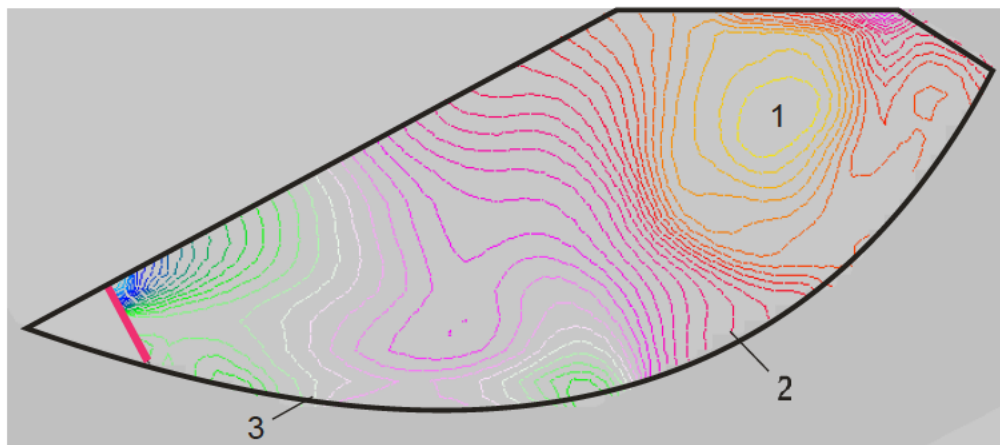


Рис. 2. Поля скорости в КС для середины (а) и конца (б) горения: S – точка зажигания; 1, 2, 3 – участки фронта горения



а



б

Рис. 3. Изотермы в КС и общие с ними изодоли содержания радикалов (%) для конца горения в последовательности $T/NO/CO/O/OH$:
а - изолиния 1 - 3000 К/1,32/ 1,24/ 0,46/ 1,61; 2 – 2900 К/ 1,15/ 0,72/ 0,27/ 1,12; 3 - 2600 К/ 1,07/ 0,23/ 0,85/ 0,58; **б -** изолиния 1 - 3050 К/ 1,53/ 1,61/ 0,60/ 1,94; 2 – 2900 К/ 1,11/ 0,65/ 0,23/ 1,16; 3 - 2600 К/ 0,71/ 0,19/ 0,07/ 0,53

2. Расчеты расширения в цилиндре

На рис. 4, а, в точках 1 и 3, перепад температур достигает 600 К. К середине расширения (рис. 4, б) различия температур сильно снижаются (до 200 К), что связано с интенсивным вихревым перемешиванием. В дальнейшем конвекция ослабевает и перепад температур не изменяется.

Постепенное снижение уровня температур за счет совершения работы расширения и теплоотдачи определяет уменьшение мольных долей радикалов. Исключение составляет токсичный оксид азота NO, содержание которого «замораживается» при температурах < 2400 К. Конечная до-

ля NO составляет 1,43 %, что на два порядка превышает допустимые (по EVRO-5) значения. Это требует применения в выпускной магистрали специальных нейтрализаторов.

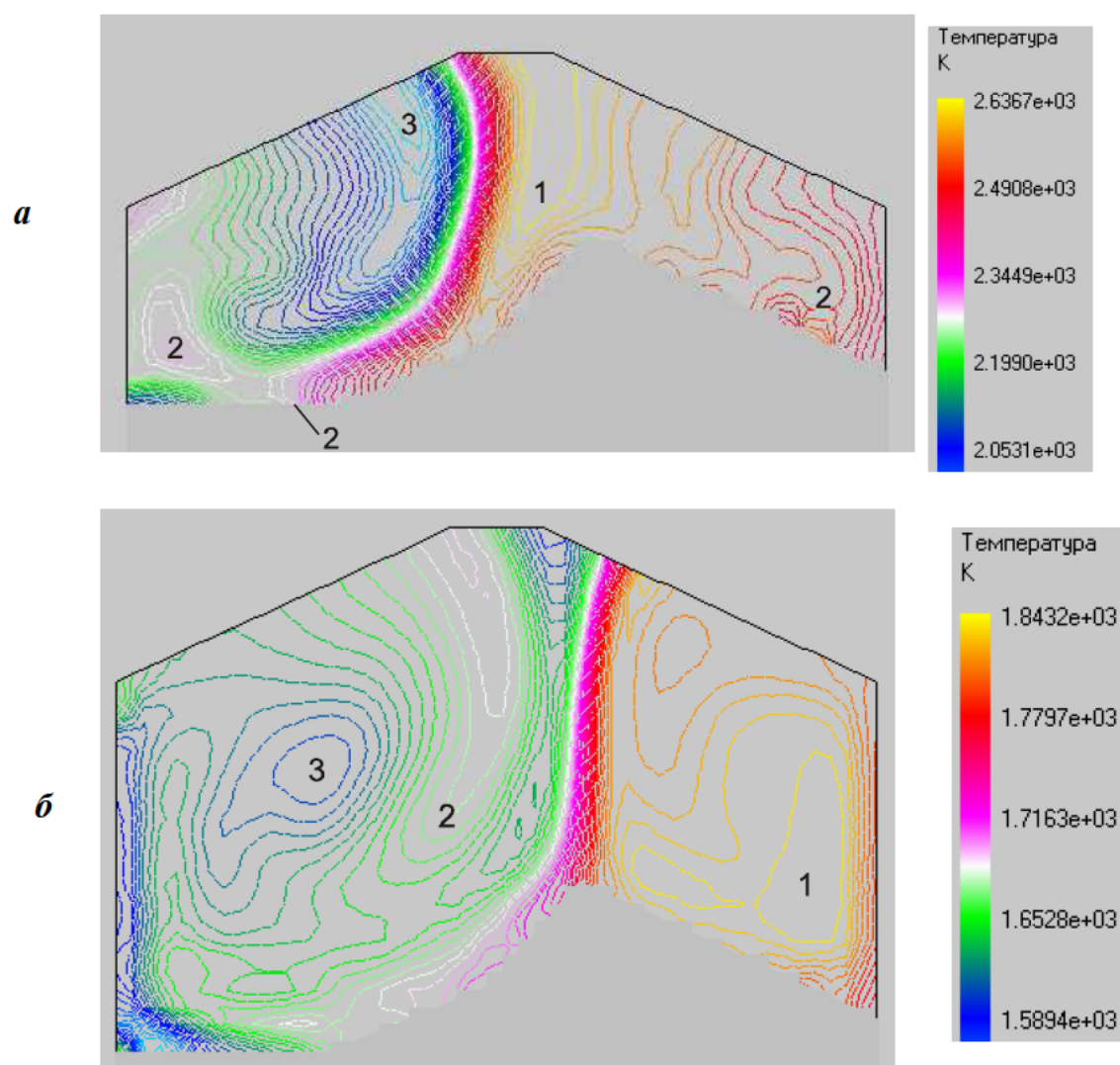


Рис. 4. Изотермы и общие с ними изодоли содержания радикалов (%) для начала (а) и середины (б) расширения в последовательности $T/NO/CO/O/OH$:

а - изолиния 1 - 2600 К/1,43/0,34/0,13/0,72; 2 – 2300 К/1,43/0,07/0,03/0,28; 3 - 2000 К/1,43/0,007/0,004/0,08; б - изолиния 1 - 1800К/1,43/0,002/0,001/0,033; 2 – 1700 К/1,43/0,001/0,001/0,02; 3 - 1600 К/1,43 / 0,001 / 0,0001 / 0,008

Отметим, что перемешивание различных струй, богатых оксидом углерода CO или окисляющими радикалами O, OH и т.д., обуславливает догорание токсичного CO и превращение его в безвредный диоксид CO₂. Конечная доля CO становится пренебрежимо малой, поскольку исходная горючая смесь содержала значительный избыток воздуха ($\alpha_{cp} = 1,5$).

Из полученного ясно, что содержание радикалов NO, CO, O, OH растёт с повышением температур. Поэтому, несмотря на то, что высокая температура горения обеспечивает большое значение к.п.д. двигателя и малый расход топлива, во многих случаях температуру горения снижают специальными методами: увеличивая избыток воздуха до $\alpha_{\text{ср}} \sim 2,5$; сдвигая период горения по времени в сторону низких давлений такта расширения; используя рециркуляцию отработавших газов – подмешивая их в свежую горючую смесь перед воспламенением и т.п.

Список литературы

1. Чесноков С.А., Дунаев В.А. Тепломассообмен и горение в автомобильных двигателях. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. 400 с.
2. Чесноков С.А., Фролов Н.Н., Березин В.А. Исследование внутрицилиндровых процессов в двигателях методом спектроскопии пламен // Двигателестроение. 2011. № 1. С. 3–8.
3. Чесноков С.А., Потапов С.А. Химический турбулентный тепло-массообмен в двигателях внутреннего сгорания / 2-е изд., перераб. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. 500 с.

Чесноков Сергей Александрович, д-р техн. наук, проф., sachesn45@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ле Дай Лам, аспирант, Россия, sachesn45@mail.ru, Тула, Тульский государственный университет,

Лукин Сергей Эдуардович, магистр, нач. отдела программного обеспечения, sachesn45@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

CALCULATION OF BURNING AND EXPANSION IN A GAS ENGINE USING THE WEB GAS2-DWS

S.A. Chesnokov, Le Dai Lam, S.E. Lukin

The features of an interactive application programs such GAS2 solutions for test problems in the calculation of combustion and expansion in gas engines. Results on the content of toxic components.

Key words: gas engine, the excess air ratio, combustion and after-burning, interactive software solutions for the computer.

Chesnokov Sergej Aleksandrovich, doctor of technical sciences, professor, sachesn45@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Le Dai Lam, postgraduate, sachesn45@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Lukin Sergej Jeduardovich, magistr, sachesn45@mail.ru, Russian, Tula, Tula State University

ЭНЕРГЕТИКА, ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ, ЭЛЕКТРОПРИВОД

УДК 539.3:534.1

НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ГАЛОПИРОВАНИЕ ПРОВОДА С ОБЛЕДЕНЕНИЕМ

Ф.Н. Шклярчук, А.Н. Данилин

Рассматривается нелинейная задача о пространственных аэроупругих колебаниях провода с обледенением в пролёте воздушной линии электропередачи (ВЛ). Получены общие уравнения движения провода в обобщенных координатах с учётом нелинейностей упругих, инерционных и аэродинамических сил. Получены также линеаризованные уравнения малых аэроупругих колебаний относительно статического положения равновесия. Последние уравнения позволяют определить критическую скорость ветра, вызывающего флаттер провода с обледенением.

Ключевые слова: провод воздушной линии электропередачи, гололёд, нелинейные колебания, галопирование, метод Рунге, линеаризованные уравнения, флаттер.

Считается, что колебания провода происходят относительно некоторого начального прогиба (провисания), вызванного действием гравитации и ветрового потока. Сила натяжения провода определяется квадратичной зависимостью от поперечных перемещений и считается постоянной по длине пролёта. Поперечные перемещения и угол закручивания сечений провода представляются в виде рядов по синусам, зависящих от целого параметра, определяющего число полуволн в пролёте. В качестве обобщенных перемещений принимаются коэффициенты тригонометрических разложений [1-5].

Колебания проводов разделяют на три условные группы. Одну из них образуют эоловы вибрации, которые возбуждаются в натянутых проводах ветровым потоком [6-9].

Эоловы вибрации обычно наблюдаются при относительно слабом ветре и отсутствии на проводах обледенения (гололёда) с образованием стоячих волн, главным образом в окрестности вертикальной плоскости с частотами примерно от 5 до 100 Гц. Скорость ветра при возникновении вибрации может колебаться от 0,5-0,8 до 3-8 м/с. Колебания возбуждаются из-за срыва воздушного потока за проводом в виде вихревых дорожек [10].

Другим видом колебаний являются колебания проводов расщеп-

лённых фаз, вызываемые действием аэродинамического следа. Такие колебания часто называются субколебаниями. Математическое описание аэродинамики фазных проводов сложнее и даётся с разной степенью приближения в многочисленных работах, например, [11-15].

Третью группу представляют низкочастотные колебания с большой амплитудой и большой длиной волны. Такое явление называется пляской проводов (галопированием), которая возникает при сочетании устойчивого ветра с обледенением (гололёдо-изморозевым отложением или гололёдом) при скоростях ветра 5-20 м/с и направлении чаще под углом 30-70° к оси линии [1-5 и др.]. Гололёд обычно откладывается с наветренной стороны провода. Если гололёдное отложение имеет несимметричную форму относительно оси провода, то поворот провода приводит к изменению воздействующей на него подъемной силы, а это может стать причиной флаттерных колебаний провода в вертикальной плоскости.

Исследованию пляски посвящены многочисленные работы. В 1932 г. Ден-Хартогом было выполнено исследование колебаний профиля в форме полукруга с одной степенью свободы [16]. В результате им было получено необходимое условие возникновения галопирования, зависящее только от аэродинамических характеристик профиля. Впоследствии было показано, что это условие является достаточным для колебаний поперёк потока при отсутствии внутреннего демпфирования [3]. В дальнейшем были разработаны различными авторами другие модели, в том числе на основе метода конечных элементов и с использованием лицензированных вычислительных комплексов. В настоящей работе предлагается новый подход, основанный на представлениях искомым переменных в виде тригонометрических рядов, коэффициенты которых образуют группу обобщенных координат задачи [17].

1. Основные допущения и определяющие соотношения

Рассматривается провод в пролёте ВЛ, подвешенный по концам к опорам в узлах 0, 1, как это показано на рис. 1.

Пусть l_0 – длина провода в пролёте при нормальной температуре, а l – длина пролёта (расстояние между узлами креплений изоляторов к опорам). Тогда начальное удлинение провода без учёта упругой деформации равно

$$\Delta_0 = l_0(1 + \alpha T) - l, \quad (1)$$

где T – приращение температуры относительно её нормального значения, α – коэффициент линейного расширения. Это удлинение реализуется в свободном провисании провода под действием сил гравитации в плоскости Oxz .

Поперечный ветровой поток, воздействующий на провод вдоль оси Oy со скоростью $V_0(x, t)$, вызывает отклонение и вибрацию провода с относительно его статического положения. Обозначим перемещения провода

вдоль осей Ox , Oy и Oz через $u(x, t)$, $v(x, t)$, $w(x, t)$ соответственно, а угол закручивания провода – через $\varphi(x, t)$. На рис. 1 показаны положительные направления этих величин. Здесь же показаны действующие на провод компоненты аэродинамической силы Y , Z , направленные вдоль Oy и Oz соответственно, и аэродинамический момент M .

Пусть ε – полное относительное удлинение провода, а N – сила его натяжения. Тогда по закону Гука при $\varepsilon > \Delta_0/l$ с учётом (1) имеем:

$$N = EFU/l, \quad U = \varepsilon l - \Delta_0, \quad (2)$$

где EF – жесткость провода на растяжение.

Крутящий момент в произвольном сечении провода $M_t = GJ\varphi'$, где GJ – жесткость провода на кручение.

Жесткости EF и GJ считаются в пределах пролёта величинами постоянными.

Продольную деформацию будем определять в виде квадратичной зависимости от поперечных перемещений в виде

$$\varepsilon = u' + 0.5(v'^2 + w'^2), \quad (3)$$

где штрих обозначает производную соответствующей величины по x .

Пренебрегая продольными инерционными силами, получаем, что сила натяжения по длине провода постоянна, т.е. $N(x, t) \approx N(t)$. Поэтому из закона Гука следует, что деформация по длине провода также постоянна, т.е. $\varepsilon(x, t) \approx \varepsilon(t)$.

В этом случае, интегрирование (3) по x даёт

$$\varepsilon = \frac{1}{2l} \int_0^l (v'^2 + w'^2) dx, \quad (4)$$

Из (3) и (4) следует выражение для продольного перемещения в виде:

$$u = \frac{1}{2} \left[\frac{x}{l} \int_0^l (v'^2 + w'^2) dx - \int_0^x (v'^2 + w'^2) dx \right], \quad (5)$$

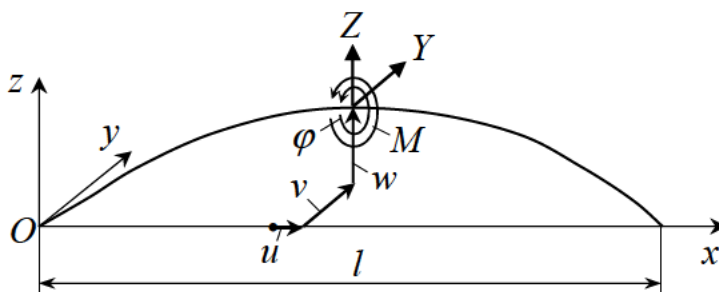


Рис. 1. Провод в пролёте ВЛ

Если считать, что углы наклона оси провода относительно координатных осей малы, то $|v'| \ll 1$, $|w'| \ll 1$. Поэтому, как видно из (5), $u \approx 0$.

В соответствии с методом Ритца, поперечные перемещения точек осевой

линии провода и угол его закручивания будем представлять в виде конечных рядов по синусам в виде:

$$v = \sum_{k=1}^n q_k \sin \frac{k\pi x}{l}, \quad w = \sum_{k=1}^n r_k \sin \frac{k\pi x}{l}, \quad \varphi = \sum_{k=1}^n p_k \sin \frac{k\pi x}{l}. \quad (6)$$

Коэффициенты разложений $q_k = q_k(t)$, $r_k = r_k(t)$, $p_k = p_k(t)$ ($k = 1, \dots, n$) принимаются в качестве обобщенных координат, подлежащих определению.

2. Потенциальная и кинетическая энергия провода

Потенциальная энергия провода при его растяжении и кручении

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^l (EF \varepsilon^2 + GF \varphi'^2) dx. \quad (7)$$

Подстановка (4), (6) в (7) и интегрирование по x приводит к выражению

$$\Pi = \frac{1}{2l} \left(EF U^2 + GF \frac{\pi^2}{2} \sum_k k^2 p_k^2 \right), \quad (8)$$

где

$$U = \frac{\pi^2}{4l} \sum_k k^2 (q_k^2 + r_k^2) - \Delta_0. \quad (9)$$

Кинетическая энергия провода с постоянным по длине гололёдом определяется общим выражением

$$T = \frac{\mu}{2} \int_0^l [\dot{v}^2 + \dot{w}^2 + \rho_0^2 \dot{\varphi}^2 + 2\dot{\varphi}(\zeta_T \dot{w} - \eta_T \dot{v})] dx, \quad (10)$$

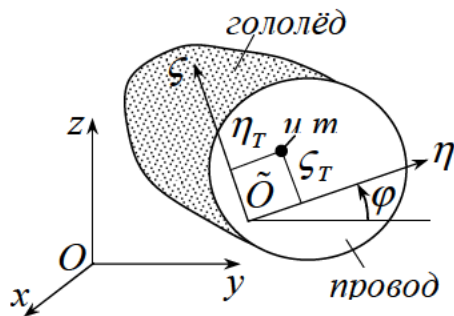


Рис. 2. Сечение провода с гололёдом

где μ – погонная масса провода с гололёдом; ζ_T, η_T – координаты центра тяжести сечения провода с гололёдом в локальной координатной системе $\tilde{O}\eta\zeta$, жестко связанной с сечением (см. рис. 2); $\rho_0 = \sqrt{J_0/\mu}$ – радиус инерции сечения провода с гололёдом, J_0 – погонный массовый момент инерции относительно оси жесткости провода.

После подстановки (6) в (10) и интегрирования по x , получаем

$$T = \frac{1}{2} \sum_k \dot{q}_k^2 + \frac{1}{2} \sum_k \dot{r}_k^2 + \frac{\rho_0^2}{2} \sum_k \dot{p}_k^2 + \eta_T \sum_k \dot{p}_k \dot{r}_k - \zeta_T \sum_k \dot{p}_k \dot{q}_k. \quad (11)$$

3. Виртуальная работа распределённых по длине провода нагрузок

Вертикальное перемещение центра тяжести ($y.m.$) сечения провода с гололёдом $w + \eta_T \sin \varphi + \zeta_T \cos \varphi$. Вариация этого перемещения равна

$\delta w + (\eta_T \cos \varphi - \zeta_T \sin \varphi) \delta \varphi$. При малых углах кручения имеем $\delta w + (\eta_T - \zeta_T \varphi) \delta \varphi$. С учётом этого допущения вариация гравитационной нагрузки

$$\delta A_g = -\mu g \int_0^l [\delta w + (\eta_T - \zeta_T \varphi) \delta \varphi] dx. \quad (12)$$

Виртуальная работа аэродинамических сил Y, Z и момента M

$$\delta A_a = \int_0^l (Y \delta v + Z \delta w + M \delta \varphi) dx. \quad (13)$$

Объединяя (12), (13), получаем суммарную виртуальную работу

$$\delta A = \int_0^l \{Y \delta v + (Z - \mu g) \delta w + [M + \mu g (\eta_0 - \zeta_0 \varphi)] \delta \varphi\} dx. \quad (14)$$

На рис. 3 показаны аэродинамические нагрузки, действующие на колеблющийся провод с гололёдом. Подъемная сила L , сила сопротивления D и момент M , действующие на единицу длины провода в процессе колебаний под воздействием ветра, в соответствии с квазистационарной теорией записываются в форме

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 d C_L(\alpha), \quad D = \frac{1}{2} \rho V^2 d C_D(\alpha), \quad M = \frac{1}{2} \rho V^2 d^2 C_M(\alpha). \quad (15)$$

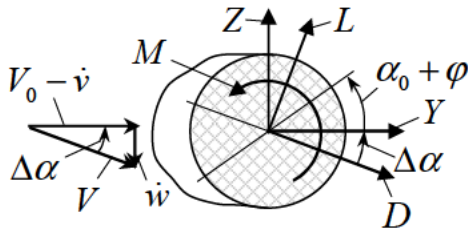


Рис. 3. Составляющие угла атаки и аэродинамические силы, действующие на провод с гололёдом

Здесь $\alpha = \alpha_0 + \varphi + \Delta \alpha$ – угол атаки сечения провода, где α_0 определяется из условий равновесия начального (статического) состояния; угловое приращение, обусловленное движением провода, $\Delta \alpha = \arctan [\dot{w}/(V_0 - \dot{v})]$; $V^2 = (V_0 - \dot{v})^2 + \dot{w}^2$; C_L , C_D , C_M – аэродинамические коэффициенты сечения провода с гололёдом, d – диаметр провода, ρ – плотность воздушного потока.

Считая углы φ и $\Delta \alpha$ малыми величинами, запишем линеаризованные выражения аэродинамических величин:

$$\Delta \alpha \approx \dot{w}/V_0, \quad V^2 \approx V_0^2 - 2V_0 \dot{v}; \quad Z \approx L - D \Delta \alpha, \quad Y \approx D + L \Delta \alpha,$$

$$C_L(\alpha) = C_L(\alpha_0) + C_L^\alpha(\alpha_0)(\varphi + \Delta \alpha), \quad C_D(\alpha) = C_D(\alpha_0) + C_D^\alpha(\alpha_0)(\varphi + \Delta \alpha), \quad (16)$$

$$C_M(\alpha) = C_M(\alpha_0) + C_M^\alpha(\alpha_0)(\varphi + \Delta \alpha),$$

где α_0 – угол атаки неподвижного провода с гололёдом при обтекании его поперечным потоком со скоростью V_0 . Зависимости аэродинамических коэффициентов C_L , C_D и C_M от α_0 получают из экспериментов.

С учётом (16) из (15) следует

$$\begin{aligned} Z &= 1/2 \cdot \rho V_0^2 d \left[C_L + C_L^\alpha \varphi - 2C_L (\dot{v}/V_0) + (C_L^\alpha - C_D) (\dot{w}/V_0) \right], \\ Y &= 1/2 \cdot \rho V_0^2 d \left[C_D + C_D^\alpha \varphi - 2C_D (\dot{v}/V_0) + (C_L + C_D^\alpha) (\dot{w}/V_0) \right], \\ M &= 1/2 \cdot \rho V_0^2 d^2 \left(C_M + C_M^\alpha \varphi - 2C_M (\dot{v}/V_0) + C_M^\alpha (\dot{w}/V_0) \right). \end{aligned} \quad (17)$$

Тогда, вариация работы распределённых нагрузок записывается в виде

$$\delta A = \sum_k (P_k \delta p_k + Q_k \delta q_k + R_k \delta r_k), \quad (18)$$

где обобщенные силы

$$\begin{aligned} P_k &= \frac{\rho V_0^2}{4} \cdot l d^2 \left(C_M \beta_k + C_M^\alpha \frac{p_k}{2} - \frac{C_M}{V_0} \dot{q}_k + \frac{C_M^\alpha}{2V_0} \dot{r}_k \right) - \mu g l \left(\eta_T \beta_k - \zeta_T \frac{p_k}{2} \right), \\ Q_k &= \frac{\rho V_0^2}{2} \cdot l d \left[C_D \beta_k + C_D^\alpha \frac{p_k}{2} - \frac{C_L}{V_0} \dot{q}_k + (C_D^\alpha + C_L) \frac{\dot{r}_k}{2V_0} \right], \\ R_k &= \frac{\rho V_0^2}{2} \cdot l d \left[C_L \beta_k + C_L^\alpha \frac{p_k}{2} - \frac{C_L}{V_0} \dot{q}_k + (C_L^\alpha - C_D) \frac{\dot{r}_k}{2V_0} \right] - \mu g l \beta_k; \\ \beta_k &= \frac{1}{\pi k} [1 - (-1)^k]. \end{aligned} \quad (19)$$

4. Нелинейные уравнения колебаний

Запишем уравнения аэроупругих колебаний провода с гололёдом в виде уравнений Лагранжа второго рода в обобщенных координатах

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial T}{\partial q_k} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_k} = F_k \quad (k = 1, \dots, n), \quad (20)$$

где Π , T – потенциальная и кинетическая энергии, F_k – обобщенные силы.

Используя (8), (11) для Π , T , и (19) для F_k , из (20) получим:

$$\begin{aligned} \mu l \left[\rho_0^2 \ddot{p}_k + \frac{1}{2} (\eta_T \ddot{r}_k - \zeta_0 \ddot{q}_k) \right] &= -\frac{l G J}{2} \left(\frac{\pi k}{l} \right)^2 p_k + P_k, \\ \frac{\mu l}{2} (\ddot{q}_k - \zeta_T \ddot{p}_k) &= -\frac{N l}{2} \left(\frac{\pi k}{l} \right)^2 q_k + Q_k, \\ \frac{\mu l}{2} (\ddot{r}_k + \eta_T \ddot{p}_k) &= -\frac{N l}{2} \left(\frac{\pi k}{l} \right)^2 r_k + R_k, \end{aligned} \quad (21)$$

где N даётся формулами (2).

Нелинейные уравнения (21) интегрируются численно при заданных начальных условиях. При этом, если в некоторые промежутки времени оказывается, что $U < 0$ (9), то необходимо положить $U = 0$.

Для оценки критической скорости флаттера провода с гололёдом ис-

пользуются линеаризованные уравнения.

Предположим, что мы имеем решение задачи о статическом равновесии провода в поле гравитационных и ветровых нагрузок. Решение, соответствующее такому состоянию, будем помечать верхним индексом «0». Для обозначения малых возмущений этого состояния, вызванных колебательным процессом, будем использовать индекс «1». Тогда

$$\begin{aligned}\varphi &= \varphi^0 + \varphi^1, \quad v = v^0 + v^1, \quad w = w^0 + w^1; \\ p_k &= p_k^0 + p_k^1, \quad q_k = q_k^0 + q_k^1, \quad r_k = r_k^0 + r_k^1 \quad (k=1, 2, \dots, n).\end{aligned}\quad (22)$$

Линеаризованные уравнения для определения p_k^1 , q_k^1 , r_k^1 записываются в виде

$$\begin{aligned}\mu l \left[\rho_0^2 \ddot{p}_k + \frac{1}{2} (\eta_T \ddot{r}_k - \zeta_0 \ddot{q}_k) \right] &= - \frac{(\pi k)^2}{2l} GJ p_k^1 + P_k^1, \\ \frac{\mu l}{2} (\ddot{q}_k - \zeta_T \ddot{p}_k) &= - \frac{(\pi k)^2}{2l} (N^0 q_k^1 + q_k^0 N^1) + Q_k^1, \\ \frac{\mu l}{2} (\ddot{r}_k + \eta_T \ddot{p}_k) &= - \frac{(\pi k)^2}{2l} (N^0 r_k^1 + r_k^0 N^1) + R_k^1,\end{aligned}\quad (23)$$

Здесь:

$$N^0 = \frac{EF}{l} \left[\frac{\pi^2}{4l} \sum_k k^2 (q_k^{0^2} + r_k^{0^2}) - \Delta_0 \right], \quad N^1 = \frac{EF}{2l^2} \pi^2 \sum_k k^2 (q_k^0 q_k^1 + r_k^0 r_k^1);$$

а выражения для P_k^1 , Q_k^1 и R_k^1 следуют из (19):

$$\begin{aligned}P_k^1 &= \frac{\rho V_0^2}{4} \cdot l d^2 \left(C_M^\alpha \frac{p_k^1}{2} - \frac{C_M}{V_0} \dot{q}_k^1 + \frac{C_M^\alpha}{2V_0} \dot{r}_k^1 \right) + \mu g l \zeta_T \frac{p_k^1}{2}, \\ Q_k^1 &= \frac{\rho V_0^2}{2} \cdot l d \left[C_D^\alpha \frac{p_k^1}{2} - \frac{C_L}{V_0} \dot{q}_k^1 + (C_D^\alpha + C_L) \frac{\dot{r}_k^1}{2V_0} \right], \\ R_k^1 &= \frac{\rho V_0^2}{2} \cdot l d \left[C_L^\alpha \frac{p_k^1}{2} - \frac{C_L}{V_0} \dot{q}_k^1 + (C_L^\alpha - C_D) \frac{\dot{r}_k^1}{2V_0} \right].\end{aligned}$$

5. Задача о динамической неустойчивости

Полученные дифференциальные уравнения колебаний (23) сводятся к системе однородных обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка и записываются в матричном виде

$$A\dot{\mathbf{r}} + C\mathbf{r} = 0,$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} M & O \\ O & E \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} D & K + B \\ -E & O \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{q}^T = [p_1^1 \ q_1^1 \ r_1^1 \ p_2^1 \ q_2^1 \ r_2^1 \ \dots]$ – вектор искомых обобщенных координат

возмущенного состояния; M, K – симметричные матрицы инерции и жесткости; D, B – матрицы аэродинамического демпфирования и аэродинамической жесткости.

Полагая $\mathbf{r} = \mathbf{R}e^{\lambda t}$, приходим к системе однородных алгебраических уравнений $(\lambda A + C)\mathbf{R} = 0$. Из условия равенства нулю определителя этой системы определяются комплексные собственные значения задачи $\lambda_\nu = \alpha_\nu \pm i\omega_\nu$ ($\nu = 1, 2, \dots$) для заданного значения скорости ветрового потока V_0 . Увеличивая V_0 от некоторого начального состояния, строятся зависимости $\alpha_\nu = \alpha_\nu(V_0)$. Критическая скорость флаттера определяется из условия $\alpha_\nu = 0$ при смене знака одной из этих функций с отрицательного на положительный.

6. Пример

Рассматривается сталеалюминиевый провод АС 550/71 с характеристиками: $d = 32.4 \text{ мм}$, $EF = 4.81 \cdot 10^7 \text{ Н}$, $GJ = 400 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$, $\alpha = 19.8 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $\mu = 2.076 \text{ кг/м}$, $l = 200 \text{ м}$, $l_0 = 202 \text{ м}$. Температура внешней среды -2°C . Аэродинамические коэффициенты для поперечного сечения провода с гололёдом ($\eta_T = -6 \text{ мм}$, $\zeta_T = 0$) взяты из [5].

В результате вычислений определена критическая скорость флаттера $V_0^* = 8.25 \text{ м/с}$ с частотой колебаний $\omega_0^* = 2.1 \text{ с}^{-1}$. Предварительно были решена задача о статическом состоянии провода и определены начальные параметры: натяжение $N = 10000 \text{ Н}$, угол закручивания $\varphi = 0.6 \text{ рад.}$, максимальные горизонтальные и вертикальные перемещения провода $v = 2.4 \text{ м}$, $w = 12 \text{ м}$.

Получены общие уравнения колебаний провода с гололёдом в обобщенных координатах с нелинейностями упругих, инерционных и аэродинамических сил.

Следуя методу Ритца, поперечные перемещения и угол закручивания провода представляются в виде тригонометрических рядов, коэффициенты которых принимаются в качестве обобщенных координат задачи. Это позволяет исследовать влияние различных гармоник на динамическое поведение провода в целом.

Предлагаемый подход позволяет определять критическую скорость и частоту флаттера и моделировать закритическое поведение провода (галопирование). Подход допускает различные упрощения (линеаризация, квадратичные приближения) и легко обобщается на случай нескольких проводов, подвешенных на опорах многопролётных ВЛ с помощью гирлянд изоляторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ: код проекта 12-08-00577-а.

Список литературы

1. Keutgen R. Galloping Phenomena. A Finite Element Approach. Ph.D. Thesis. Collection des publications de la Faculté des Sciences. – Liège: Appliуées de l'Université de Liège. No. 191, 1999. 202 p.
2. Rawlins C.B. Numerical Studies of the Galloping Stability of Single Conductors. Technical Paper No. 30. Spartanburg: Alcoa Conductor Products Company. Spartanburg, Sc. June. 1993.
3. Ванько В.И. Математическая модель пляски провода ЛЭП // Изв. вузов. Энергетика. 1991. № 11. С.36–42.
4. Колебания проводов воздушных линий под воздействием ветра. Учебно-справочное пособие. Часть 1. Усталостная прочность. Вибрация. Под ред. Виноградова А.А. М.: Изд-во ЗАО «Электросетьстройпроект», 2005. 185с.
5. State of the art of conductor galloping. Cigre Technical Brochure 322. Task force B2.11.06. Convenor Lilien, Jean-Louis. June 2007, 140 p.
6. Шкапцов В.А. Методические указания по типовой защите от вибрации и субколебаний проводов и грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи напряжением 35-750 кВ. М.: СПО «ОРГРЕС», 1991. 68 с.
7. Яковлев Л.В. Вибрация на воздушных линиях электропередачи и методы защиты проводов и грозозащитных тросов. М.: НТФ "Энергопрогресс", 2000. 76 с.
8. Bishop R.E.D., Hassan A.Y. The lift and Drag Forces on a Circular Cylinder Oscillating in a Flowing Fluid // Proceedings of the Royal Society of London. Ser. A. 1964. V.277. P.51-75.
9. Фельдштейн В.А., Рыжов С.В., Афанасьева О.Е., Фельдштейн И.В. Расчётное определение рациональной по условиям вибрации геометрии поддерживающего зажима спирального типа // Электрические станции. № 1. 1998. С.12-17.
10. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир, 1986. 181 с.
11. Lilien J.L., Snegovski D. Hurricane Simulation on Power Transmission Line // Proc. Vth Cable Dynamics Symp., Santa Margherita, 2003. P.313-318.
12. Lilien J.L., Snegovski D. Wake-Induced Vibration of Power Transmission Line: Parametric Study // Proc. 8th Conf. on Flow-Induced Vibration, Paris, 2004. P.421-425.
13. Mair W. A., Maull D. J. Aerodynamic behaviour of bodies in the wake of other bodies // Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. series A., 1971. No.268. P.425-437.
14. Rawlins C.B. Fundamental concepts in the analysis of wake-induced oscillation of bundled conductor // IEEE Trans. PAS. 1976. V.95. No.4. P.1377-

1393.

15. EPRI Transmission line reference book. Wind-induced Conductor motion. Electric Power Research Institute: Final Report, November, 2006.

16. Den-Hartog J.P. Transmission line's vibrations due to sleet // Transactions AIEE. 1932. V.51. P.1074-1076.

17. Danilin A.N., Shklyarchuk F.N., Lilien J.-L., Snegovskiy D.V., Vinogradov A.A., Djamanbayev M.A. Nonlinear Aeroelastic Vibrations and Galloping of Iced Conductor Lines under Wind. 7th International Symposium on Cable Dynamics. Vienna (Austria), 10-13 December 2007. P. 129-134.

Шклярчук Фёдор Николаевич, д-р техн. наук, проф., Заслуженный деятель науки и техники, главный научный сотрудник, shklyarchuk@list.ru, Россия, Москва, ФГБУН Институт прикладной механики Российской академии наук; ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (государственный технический университет)»,

Данилин Александр Николаевич, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Россия, Москва, ФГБУН Институт прикладной механики Российской академии наук, ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (государственный технический университет)»

NONLINEAR AEROELASTIC VIBRATIONS AND GALLOPING OF ICED CONDUCTOR IN THE OVERHEAD POWER LINE SPAN

F.N. Shklyarchuk, A.N. Danilin

Nonlinear problem of spatial aeroelastic vibrations of iced conductor is considered. It is assumed that the vibrations occur relative to the initial deflection caused by gravity and wind flow. General equations of the conductor motion and the linearized equations for small aeroelastic vibrations around the static equilibrium position are obtained in the generalized coordinates with nonlinear elastic, inertial and aerodynamic forces. The linearized equations allow determining the critical speed of the conductor flutter.

Key words: conductor of overhead transmission line, ice accretion, nonlinear oscillations, galloping, Ritz method, linearized equations, flutter

Shklyarchuk Fedor Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, shklyarchuk@list.ru, Russian, Moscow, Honoured Worker of Science and Technology, Principle Fellow, Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow Aviation Institute (State Technical University),

Danilin Alexander Nikolaevich, doctor of physical and mathematical sciences, senior Fellow, andanilin@yandex.ru, Russian, Moscow, Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences, Professor of the Moscow Aviation Institute (State Technical University)

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ЦИФРОВЫМИ ФИЛЬТРАМИ

А.В. Соболев, А.И. Ляшенко, Ю.В. Соболева, Д.П. Вент

Предложен вариант энергосберегающей САР с цифровыми фильтрами. Описан подход к расчету такой системы. Проведен сравнительный анализ качества переходных процессов в энергосберегающей САР и соответствующих одноконтурных системах.

Ключевые слова: энергосберегающая система автоматического регулирования, цифровой фильтр, квадратичный интегральный критерий качества, переходные процессы.

Повысить энергетическую эффективность технологических процессов и обеспечить при этом высокую динамическую точность регулирования можно путем создания энергосберегающих систем автоматического регулирования (ЭСАР). Общая структура и алгоритм работы таких систем представлены в источнике [1].

На основании общей структуры ЭСАР предложен вариант цифровой энергосберегающей САР, показанной на рис. 1. В более инерционном канале управления, обладающем худшими динамическими свойствами, но выгодном с позиции энергосберегающего управления в статике, предлагается использовать фильтр низких частот ЦФ₂. В более быстродействующем динамически эффективном канале управления, проигрывающем однако по энергетическим показателям в статических режимах, предлагается использовать фильтр высоких частот ЦФ₁.

В качестве фильтра ЦФ₂ используется дискретное звено, представляющее собой экстраполятор нулевого порядка в сочетании с тактовым квантователем, близким к идеальному. Соответствующая частотная передаточная функция такого цифрового фильтра будет иметь вид:

$$W_{\text{ЦФ}_2}(j\omega) = \frac{1}{T_{0_2}} \cdot \frac{1 - e^{-j\omega T_{0_2}}}{j\omega}, \quad (1)$$

где T_{0_2} – настроечный параметр фильтра ЦФ₂.

Что касается фильтра ЦФ₁, то его реализация представляет собой разность между сигналом и его преобразованием вторым фильтром низких частот. Соответствующая частотная передаточная функция имеет вид:

$$W_{\text{ЦФ}_1}(j\omega) = 1 - \frac{1}{T_{0_1}} \cdot \frac{1 - e^{-j\omega T_{0_1}}}{j\omega}, \quad (2)$$

где T_{0_1} – настроечный параметр фильтра ЦФ₁.

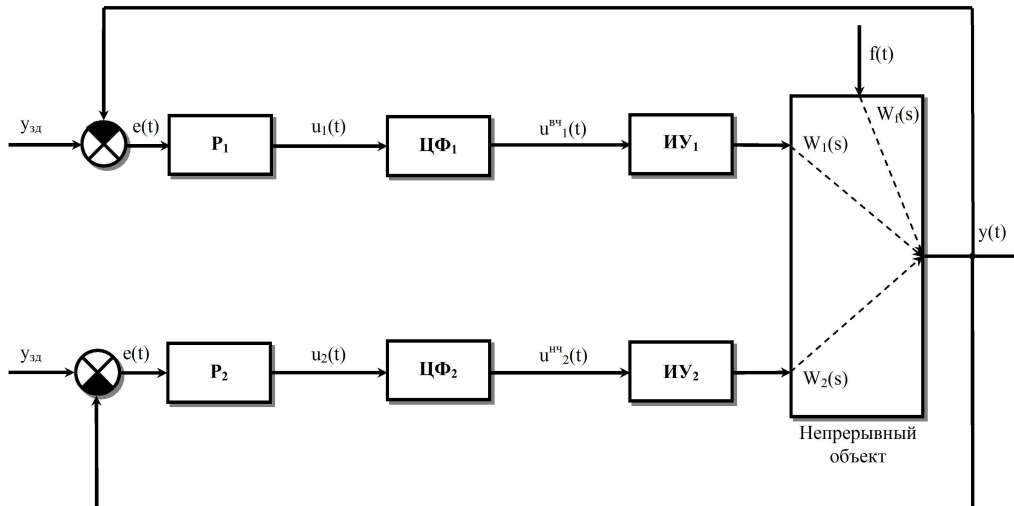


Рис. 1. Структура энергосберегающей САР с цифровыми фильтрами:
 P_1, P_2 – регуляторы; ЦФ_1 – цифровой фильтр высоких частот;
 ЦФ_2 – цифровой фильтр низких частот; $y_{зд}, y(t)$ – соответственно
 заданное и текущее значение регулируемой переменной;
 $e(t)$ – ошибка регулирования; $f(t)$ – возмущающее воздействие;
 $u_1(t), u_2(t)$ – управляющие воздействия регуляторов;
 $u^{вч}_1(t), u^{нч}_2(t)$ – управляющие воздействия регуляторов в области
 верхних и нижних частот; $W_1(s), W_2(s)$ – соответственно
 передаточные функции объекта по динамически-
 и энергоэффективному каналам управления;
 $W_f(s)$ – передаточная функция по каналу возмущения

Методику расчета предлагаемого варианта ЭСАР получим в предположении, что соответствующие фильтры ЦФ_1 и ЦФ_2 близки к идеальным, частотные передаточные функции которых имеют вид:

$$W_{\text{ЦФ}_1}(j\omega) = \begin{cases} 1, & \omega > \omega_0 \\ 0, & \omega \leq \omega_0 \end{cases}, \quad W_{\text{ЦФ}_2}(j\omega) = \begin{cases} 1, & \omega \leq \omega_0 \\ 0, & \omega > \omega_0 \end{cases},$$

где ω_0 – некоторая предельная частота, разделяющая свойства каналов управления.

В качестве критерия динамической оптимизации синтезируемой ЭСАР с цифровыми фильтрами будем использовать квадратичный интегральный критерий при действии детерминированных возмущений наиболее тяжелого характера:

$$I_1 = \int_0^{\infty} y^2(t) dt \rightarrow \min \quad (3)$$

Значение критерия (3) для ЭСАР может быть вычислено по следующей формуле:

$$I_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left| \frac{W_f(j\omega)}{1 + R_1(j\omega)W_{\Pi\Phi_1}(j\omega)W_1(j\omega) + R_2(j\omega)W_{\Pi\Phi_2}(j\omega)W_2(j\omega)} \right|^2 \cdot \frac{1}{\omega^2} d\omega,$$

где $R_1(j\omega)$, $R_2(j\omega)$ – частотные передаточные функции регуляторов соответственно в динамически- и энергоэффективном канале управления; $W_{\Pi\Phi_1}(j\omega)$, $W_{\Pi\Phi_2}(j\omega)$ – частотные передаточные функции фильтров соответственно в динамически эффективном и энергоэффективном канале управления; $W_1(j\omega)$, $W_2(j\omega)$ – частотные передаточные функции объекта соответственно по динамически- и энергоэффективному каналу управления; $W_f(j\omega)$ – частотная передаточная функция по каналу возмущения.

В силу свойства аддитивности интеграла и идеальных фильтрующих свойств фильтров квадратичных критерий для ЭСАР будет иметь вид:

$$I_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_0} \left| \frac{W_f(j\omega)}{1 + R_2(j\omega)W_2(j\omega)} \right|^2 \cdot \frac{1}{\omega^2} d\omega + \frac{1}{\pi} \int_{\omega_0}^{\infty} \left| \frac{W_f(j\omega)}{1 + R_1(j\omega)W_1(j\omega)} \right|^2 \cdot \frac{1}{\omega^2} d\omega.$$

Из последнего выражения видно, что при заданных свойствах фильтров квадратичный критерий определяется двумя независимыми составляющими, которые определяют реакцию на действующее возмущение каждого из каналов управления.

Будем считать известными настройки регуляторов P_1 и P_2 для соответствующих каналов регулирования, которые также рассчитаны на основании критерия (3) и имеют частотные передаточные функции $R_1^*(j\omega)$ и $R_2^*(j\omega)$. Тогда для динамически эффективного канала управления критерий равен:

$$I'_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_0} \left| \frac{W_f(j\omega)}{1 + R_1^*(j\omega)W_1(j\omega)} \right|^2 \cdot \frac{1}{\omega^2} d\omega + \frac{1}{\pi} \int_{\omega_0}^{\infty} \left| \frac{W_f(j\omega)}{1 + R_1^*(j\omega)W_1(j\omega)} \right|^2 \cdot \frac{1}{\omega^2} d\omega,$$

а соответственно для энергоэффективного канала управления:

$$I''_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_0} \left| \frac{W_f(j\omega)}{1 + R_2^*(j\omega)W_2(j\omega)} \right|^2 \cdot \frac{1}{\omega^2} d\omega + \frac{1}{\pi} \int_{\omega_0}^{\infty} \left| \frac{W_f(j\omega)}{1 + R_2^*(j\omega)W_2(j\omega)} \right|^2 \cdot \frac{1}{\omega^2} d\omega.$$

В результате расхождение квадратичного критерия для ЭСАР и отдельно одноконтурных систем составит:

$$\Delta_1 = I'_1 - I_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_0} \left(\left| \frac{1}{1 + R_1^*(j\omega)W_1(j\omega)} \right|^2 - \left| \frac{1}{1 + R_2^*(j\omega)W_2(j\omega)} \right|^2 \right) \cdot \frac{|W_f(j\omega)|^2}{\omega^2} d\omega$$

и

$$\Delta_2 = I_1'' - I_1 = \frac{1}{\pi} \int_{\omega_0}^{\infty} \left(\left| \frac{1}{1 + R_2^*(j\omega)W_2(j\omega)} \right|^2 - \left| \frac{1}{1 + R_1^*(j\omega)W_1(j\omega)} \right|^2 \right) \cdot \frac{|W_f(j\omega)|^2}{\omega^2} d\omega.$$

С учетом того, что $W_{3.c.1}(j\omega) = \frac{1}{1 + R_1^*(j\omega)W_1(j\omega)}$ – частотная передаточная функция замкнутой одноконтурной САР по динамически эффективному каналу управления, а $W_{3.c.2}(j\omega) = \frac{1}{1 + R_2^*(j\omega)W_2(j\omega)}$ – частотная передаточная функция замкнутой одноконтурной САР по энергоэффективному каналу управления, получим:

$$\Delta_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_0} \left(|W_{3.c.1}(j\omega)|^2 - |W_{3.c.2}(j\omega)|^2 \right) \cdot \frac{|W_f(j\omega)|^2}{\omega^2} d\omega, \quad (5)$$

$$\Delta_2 = \frac{1}{\pi} \int_{\omega_0}^{\infty} \left(|W_{3.c.2}(j\omega)|^2 - |W_{3.c.1}(j\omega)|^2 \right) \cdot \frac{|W_f(j\omega)|^2}{\omega^2} d\omega. \quad (6)$$

Полученные разности (5) и (6) показывают, насколько ЭСАР эффективнее или, наоборот, в сравнении с соответствующими одноконтурными системами регулирования. Так, если Δ_1 принимает положительное значение, равно как и Δ_2 , то ЭСАР выигрывает по отношению к обеим системам регулирования. Если же, например, Δ_1 принимает отрицательное значение, а Δ_2 – положительное, то ЭСАР эффективнее одноконтурной САР по энергоэффективному каналу управления, но уступает в качестве одноконтурной САР по динамически эффективному каналу управления. Т.е. чем больше величина Δ_1 , тем ближе качество регулирования ЭСАР к качеству работы динамически эффективной системы или, в ряде случаев, выше его. Таким образом, в случае идеальной фильтрации задача поиска оптимальной частоты сводится к двум равносильным оптимизационным задачам:

$$\Delta_1 \rightarrow \max_{\omega_0} \text{ или } \Delta_2 \rightarrow \max_{\omega_0}.$$

Для нахождения решения последней оптимизационной задачи продифференцируем Δ_1 по частоте ω_0 и приравняем производную к нулю. Тогда:

$$\frac{1}{\pi} \left(|W_{3.c.1}(j\omega_0)|^2 - |W_{3.c.2}(j\omega_0)|^2 \right) \cdot \frac{|W_f(j\omega_0)|^2}{\omega_0^2} = 0.$$

Из последнего уравнения вытекает единственное возможное решение:

$$|W_{3.c.1}(j\omega_0)| = |W_{3.c.2}(j\omega_0)|.$$

Таким образом, частота ω_0 получается в точках пересечения АЧХ замкнутых одноконтурных систем регулирования для динамически эффективного и энергоэффективного каналов управления. Точек пересечения АЧХ может оказаться несколько. Выбирать необходимо точку, соответствующую частоте ω_0 , при которой величины Δ_1 и Δ_2 будут максимальны, она и задает предельную частоту перехода, определяющую полосу пропускания соответствующего цифрового фильтра.

В случае использования в динамически эффективном канале ЭСАР П-регулятора, на нулевых частотах АЧХ замкнутой системы не равна нулю (в отличие от системы с ПИ-регулятором), поэтому площадь под соответствующей кривой возрастает, что позволяет улучшить показатели (5, 6), а соответственно и общий критерий динамической оптимизации ЭСАР (3).

Определим настроечные параметры фильтров ЦФ₁ и ЦФ₂, обеспечивающие разделение каналов управления при частоте ω_0 . Для этого представим передаточную функцию фильтра, расположенного в энергоэффективном контуре регулирования, следующим образом:

$$W_{ЦФ_2}(j\omega) = \frac{1 - e^{-j\omega T_{02}}}{T_{02} \cdot j\omega} = \frac{1 - \cos(\omega T_{02}) + j \sin(\omega T_{02})}{T_{02} \cdot j\omega}.$$

Квадрат АЧХ фильтра низких частот, после домножения последнего выражения на комплексно-сопряженную величину, будет иметь вид:

$$|W_{ЦФ_2}(j\omega)|^2 = \frac{1 - 2\cos(\omega T_{02}) + [\cos(\omega T_{02})]^2 + [\sin(\omega T_{02})]^2}{(T_{02})^2 \cdot \omega^2} = \frac{2 \cdot [1 - \cos(\omega T_{02})]}{(T_{02})^2 \cdot \omega^2}.$$

Потребуем, чтобы АЧХ цифрового фильтра ЦФ₂ при частоте ω_0 принимала значение близкое к единице и была равна $1 - \Delta$ (где Δ – заданная погрешность фильтрации), а после ω_0 стремилась к нулю. Величину Δ следует принимать близкой к нулю. Тогда получим:

$$|W_{ЦФ_2}(j\omega_0)| = \sqrt{\frac{2 \cdot [1 - \cos(\omega_0 T_{02})]}{(T_{02})^2 \cdot \omega_0^2}} = 1 - \Delta.$$

Возведем левую и правую часть последнего выражения в квадрат:

$$\frac{2 \cdot [1 - \cos(\omega_0 T_{02})]}{(T_{02})^2 \cdot \omega_0^2} = (1 - \Delta)^2.$$

Для приближенного решения последнего уравнения разложим функцию косинуса в ряд Маклорена, ограничившись слагаемыми не выше четвертой степени. Имеем:

$$\frac{2 \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\omega_0^2 \cdot (T_{02})^2}{2!} + \frac{\omega_0^4 \cdot (T_{02})^4}{4!} \right) \right]}{(T_{02})^2 \cdot \omega_0^2} = 1 - \frac{1}{12} \cdot \omega_0^2 \cdot (T_{02})^2 \approx (1 - \Delta)^2.$$

В итоге, из соотношения

$$\omega_0^2 \cdot (T_{02})^2 \approx 12 - 12 \cdot (1 - 2\Delta + \Delta^2)$$

находим настроечный параметр цифрового фильтра в энергоэффективном канале управления:

$$T_{02} \approx \frac{\sqrt{12 \cdot \Delta \cdot (2 - \Delta)}}{\omega_0} \quad (7)$$

Для фильтра ЦФ₁, расположенного в динамически эффективном контуре регулирования, его передаточную функцию в частотной области можно представить как

$$W_{\text{ЦФ}_1}(j\omega) = 1 - \frac{1 - e^{-j\omega T_{01}}}{T_{01} \cdot j\omega} = \frac{[-1 + \cos(\omega T_{01})] + j \cdot [T_{01} \cdot \omega - \sin(\omega T_{01})]}{T_{01} \cdot j\omega}.$$

После домножения последнего выражения на комплексно-сопряженную величину, квадрат АЧХ фильтра высоких частот будет равен:

$$\begin{aligned} |W_{\text{ЦФ}_1}(j\omega)|^2 &= \frac{[-1 + \cos(\omega T_{01})]^2 + [T_{01} \cdot \omega - \sin(\omega T_{01})]^2}{(T_{01})^2 \cdot \omega^2} = \\ &= 1 - \frac{2 \cdot \sin(\omega T_{01})}{T_{01} \cdot \omega} + \frac{2 \cdot [1 - \cos(\omega T_{01})]}{(T_{01})^2 \cdot \omega^2}. \end{aligned}$$

После разложения в ряд Маклорена функций синуса (ограничившись разложением до пятой степени) и косинуса (ограничившись разложением до шестой степени), получим

$$|W_{\text{ЦФ}_1}(j\omega)|^2 \approx \frac{1}{4} \cdot \omega^2 \cdot (T_{01})^2 - \frac{1}{72} \cdot \omega^4 \cdot (T_{01})^4.$$

Снова потребуем, чтобы АЧХ фильтра при частоте $\omega = \omega_0$ имела единичное значение. Тогда:

$$|W_{\text{ЦФ}_1}(j\omega_0)| \approx \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \omega_0^2 \cdot (T_{01})^2 - \frac{1}{72} \cdot \omega_0^4 \cdot (T_{01})^4} = 1.$$

Возведем также обе части в квадрат:

$$\frac{1}{4} \cdot \omega_0^2 \cdot (T_{01})^2 - \frac{1}{72} \cdot \omega_0^4 \cdot (T_{01})^4 = 1$$

или

$$\omega_0^4 \cdot (T_{01})^4 - 18 \cdot \omega_0^2 \cdot (T_{01})^2 + 72 = 0.$$

Решая полученное биквадратное уравнение, находим настроечный

параметр цифрового фильтра в динамически эффективном канале управления:

$$T_{01}^1 = \frac{\sqrt{12}}{\omega_0}, \quad (8)$$

$$T_{01}^2 = \frac{\sqrt{6}}{\omega_0}. \quad (9)$$

В ходе исследований установлено, что для определения T_{01} лучше использовать формулу (8).

Рассмотрим пример расчета ЭСАР для объекта, в котором передаточная функция по динамически эффективному каналу регулирующего воздействия имеет вид:

$$W_1(s) = \frac{k_1}{T_1 \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_1 \cdot s},$$

где $k_1=3,68$, $T_1=4$ сек, $\tau_1=2,15$ сек,

а по энергоэффективному каналу соответственно:

$$W_2(s) = \frac{k_2}{T_2 \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_2 \cdot s},$$

где $k_2=4,68$, $T_2=40$ сек, $\tau_2=4,15$ сек.

Пусть регуляторы обрабатывают типовые законы управления. В частности, рассмотрим ЭСАР с ПИ-регуляторами по обоим каналам управления и ЭСАР с П-регулятором в динамически эффективном и ПИ-регулятором в энергоэффективном канале управления. Соответствующие передаточные функции регуляторов имеют вид:

$$R(s) = k_p,$$

$$R(s) = k_p + \frac{1}{T_u \cdot s},$$

где k_p – коэффициент усиления регулятора, T_u – постоянная времени интегрирования, сек.

Вначале рассчитаем оптимальные настройки регуляторов в одно-контурных системах по динамически- и энергоэффективному каналам управления по методике расчета одноконтурных САР на минимизацию критерия (3). В качестве возмущения при расчете настроек будем рассматривать возмущение, поступающее на вход объекта вместе с регулирующим воздействием. В итоге, были получены следующие оптимальные настрой-

ки для двух ПИ-регуляторов:

$$R_1^*(s) = 0,6 + \frac{1}{8 \cdot s}, \quad R_2^*(s) = 2,5 + \frac{1}{8 \cdot s}.$$

В случае использования в динамически эффективном канале управления П-регулятора, его оптимальные настройки равны:

$$R_1^*(s) = 0,8.$$

Далее построим АЧХ замкнутых одноконтурных САР без фильтров (рис. 2).

Из рис. 2 определяем точку пересечения АЧХ одноконтурных систем, соответствующую частоте ω_0 , при которой показатели (5, 6) максимальны и выполняются условия устойчивости ЭСАР.

Для ЭСАР с двумя ПИ-регуляторами получим:

$$\omega_0 = 1,5 \text{ рад/с}.$$

$$\Delta_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{1,5} \left(|W_{3.c.1}(j\omega)|^2 - |W_{3.c.2}(j\omega)|^2 \right) \cdot \frac{1}{\omega^2} d\omega = -26,545,$$

$$\Delta_2 = \frac{1}{\pi} \int_{1,5}^{10} \left(|W_{3.c.2}(j\omega)|^2 - |W_{3.c.1}(j\omega)|^2 \right) \cdot \frac{1}{\omega^2} d\omega = 0,113.$$

Определим параметры цифровых фильтров по формулам (7, 8). Величину погрешности примем равной $\Delta = 0,002$. Тогда:

$$T_{01} = \frac{\sqrt{12}}{1,5} = 2,309, \quad T_{02} = \frac{\sqrt{12 \cdot 0,002 \cdot (2 - 0,002)}}{1,5} = 0,146.$$

В случае использования в ЭСАР П-регулятора по динамически эффективному каналу управления удастся повысить устойчивость системы и улучшить критерии (5, 6). Так выбрав предельную частоту в точке $\omega_0 = 0,1$ рад/с, получаем максимум разностей:

$$\Delta_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{0,1} \left(|W_{3.c.1}(j\omega)|^2 - |W_{3.c.2}(j\omega)|^2 \right) \cdot \frac{1}{\omega^2} d\omega = 62,96,$$

$$\Delta_2 = \frac{1}{\pi} \int_{0,1}^{10} \left(|W_{3.c.2}(j\omega)|^2 - |W_{3.c.1}(j\omega)|^2 \right) \cdot \frac{1}{\omega^2} d\omega = 26,59.$$

Определим параметры цифровых фильтров по формулам (7, 8). Величину погрешности также принимаем равной $\Delta = 0,002$. Тогда:

$$T_{01} = \frac{\sqrt{12}}{0,1} = 34,641, \quad T_{02} = \frac{\sqrt{12 \cdot 0,002 \cdot (2 - 0,002)}}{1,5} = 2,19.$$

На рис. 3. приведены результаты имитационного моделирования (средствами MATLAB Simulink) работы ЭСАР с цифровыми фильтрами и

соответствующих одноконтурных систем при возмущении по нагрузке, подаваемом на вход объекта по динамически эффективному каналу управления.

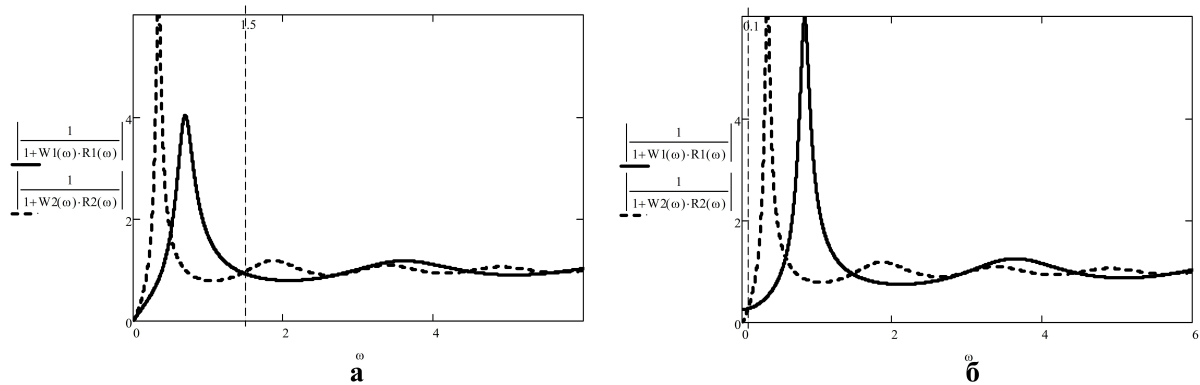


Рис. 2. АЧХ замкнутых одноконтурных систем:
а – с ПИ-регуляторами по обоим каналам управления;
б – с П-регулятором в динамически- и ПИ-регулятором в энергоэффективном канале управления

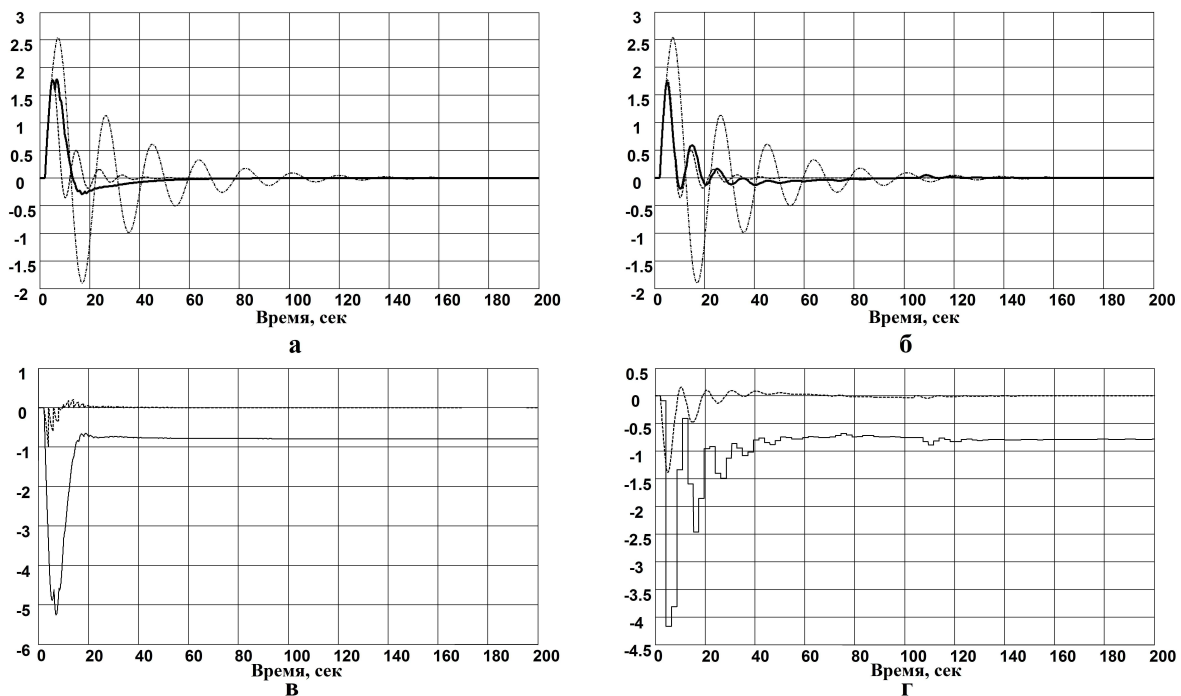


Рис. 3. Переходные процессы при ступенчатом возмущении:
а, б – реакции регулируемой переменной (штриховая линия – работа одноконтурной динамически эффективной САР; штрих-пунктирная линия – работа одноконтурной энергоэффективной САР; сплошная линия – работа ЭСАР); в, г – графики изменения регулирующих воздействий в ЭСАР (сплошная линия – изменение $u_{2}^{НЧ}(t)$; штриховая линия – изменение $u_{1}^{ВЧ}(t)$)

В таблице приведены значения квадратичного интегрального критерия для рассмотренных систем при заданном виде и месте приложения возмущения.

Показатели качества работы ЭСАР и соответствующих одноконтурных САР

		Значение критерия I_1 (3)
Одноконтурная динамически эффективная САР		10,74
Одноконтурная энергоэффективная САР		64,84
ЭСАР (известны регуляторы, считаем фильтры)	ПИ-ПИ система	17,23
	П-ПИ система	10,51

На рис. 3 (а, в) приведены переходные процессы для ЭСАР с двумя ПИ-регуляторами, а на рис. 3 (б, г) для ЭСАР с П- и ПИ-регуляторами. Анализ графиков и данных таблицы показывает, что качество предложенной ЭСАР сравнимо с качеством наилучшей одноконтурной динамически эффективной САР.

Список литературы

1. Патент РФ 2494433 на изобретение. МПК⁸ G05 В 13/00. Энергосберегающая система автоматического регулирования / А.В. Соболев, А.И. Ляшенко, Д.П. Вент, Ю.В. Соболева. Оpubл. 27.09.2013. Бюл. № 27.

Соболев Алексей Валерьевич, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой, AlexSobolev75@mail.ru, Россия, Новомосковск, НИ (ф) ФГБОУ ВПО РХТУ им. Д.И. Менделеева,

Ляшенко Александр Иванович, ведущий программист, alexlyashenko@live.ru, Россия, Новомосковск, НИ (ф) ФГБОУ ВПО РХТУ им. Д.И. Менделеева,

Соболева Юлия Владимировна, соискатель, Soboleva2135@rambler.ru, Россия, Новомосковск, НИ (ф) ФГБОУ ВПО РХТУ им. Д.И. Менделеева,

Вент Дмитрий Павлович, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, dvent@list.ru, Россия, Новомосковск, НИ (ф) ФГБОУ ВПО РХТУ им. Д.И. Менделеева

TO THE PROBLEM ON SYNTHESIS OF ENERGY-SAVING SYSTEM OF REGULATION
WITH DIGITAL FILTERS

A.V. Sobolev, A.I. Lyashenko, J.V. Soboleva, D.P. Vent

The variant of energy-saving system of automatic regulation with digital filters is proposed. The methodology for the calculation of such a system is described. A comparative analysis of the quality of transient processes in energy-saving control system and the relevant single circuit systems is performed.

Key words: energy-saving system of automatic regulation, digital filter, quadratic integral criterion of quality, transition processes.

Sobolev Alexey Valerevich, candidate of technical science, docent, manager of department, AlexSobolev75@mail.ru, Russia, Novomoskovsk, D. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia (Novomoskovsk Institute),

Lyashenko Alexander Ivanovich, leading programmer, alexlyashenko@live.ru, Russia, Novomoskovsk, D. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia (Novomoskovsk Institute),

Soboleva Julia Vladimirovna, applicant, Soboleva2135@rambler.ru, Russia, Novomoskovsk, D. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia (Novomoskovsk Institute),

Vent Dmitriy Pavlovich, doctor of technical science, professor, manager of department, dvent@list.ru, Russia, Novomoskovsk, D. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia (Novomoskovsk Institute)

УДК 621.316

УСРЕДНЁННЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОДНОТАКТНЫХ ШИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Р.А. Катаев

Предложены усреднённые дискретные математические модели однотоковых импульсных преобразователей постоянного напряжения, основанные на представлении каждого из преобразователей как совокупности неких типовых блоков. Математические модели типовых блоков также представлены в статье. Проведён анализ точности предложенной модели.

Ключевые слова: усреднённая дискретная математическая модель, импульсный преобразователь, пространство состояний, дискретизация, система управления.

Импульсные преобразователи электрической энергии находят широкое применение в источниках питания промышленной и бытовой аппаратуры. В связи с бурным развитием и удешевлением микроэлектронных устройств, в настоящее время стало возможным и перспективным построение системы управления такими преобразователями на основе мик-

роконтроллеров. Цифровая система управления обладает множеством преимуществ по сравнению с аналоговой. Вместе с тем, несколько отличается подход при проектировании преобразователей с цифровой системой управления. Это связано с появлением дискретизации по времени и появлением дополнительных задержек в контурах обратной связи.

Цель данной статьи – предложить и обосновать дискретную математическую модель типовых схем однотактных преобразователей, необходимую для проектирования цифровой системы управления.

Декомпозиция задачи

На рис.1 (а, б, в) приведены схемы однотактных преобразователей постоянного напряжения. Работа таких преобразователей подробно описана в [1].

Несмотря на различия, все три схемы содержат одинаковые под-схемы:

- 1.Транзисторный полумост VT1-VT2 с индуктивностью L на выходе.
- 2.Ёмкость C с нагрузкой, которая представлена как функция тока от выходного напряжения $i_{OUT}(v_{OUT})$.

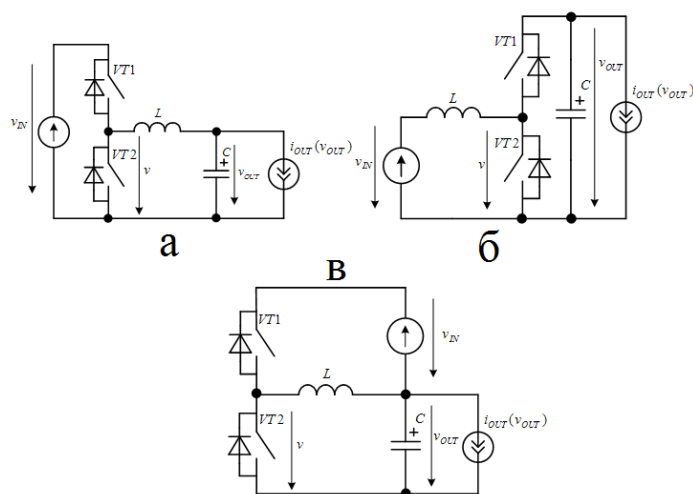


Рис. 1. Схемы однотактных двунаправленных ШИМ преобразователей постоянного напряжения: а – понижающий; б – повышающий; в – инвертирующий

Схемы различаются лишь подключениями данных подсхем между собой и к напряжению v_{IN} . Таким образом, рационально получить математические модели общих подсхем, а затем уже получить результирующие модели. Еще больший смысл это приобретает, если учесть что данные под-схемы встречаются и в других видах преобразователей, что позволяет использовать их для анализа других типов ШИМ преобразователей, конечно в рамках сделанных при разработке моделей допущений.

Дискретные математические модели общих подсхем. Общие подсхемы указанных преобразователей приведены на рис.2. Поскольку принцип работы рассматриваемых преобразователей основан на дискретной коммутации силовых электронных ключей и управление преобразователем производится с помощью микроконтроллера в дискретной форме, то необходимо получение дискретных математических моделей подсхем.

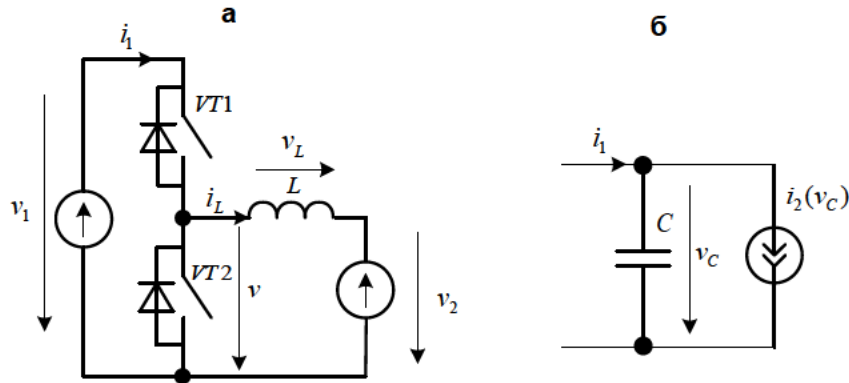


Рис. 2. Общие подсхемы рассматриваемых преобразователей:
а – подсхема №1; б – подсхема №2

Получение дискретной математической модели подсхемы №1. Введем понятие коммутационной функции с единичной амплитудой:

$$d(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, t_{ON}], \\ 0, & t \in [t_{ON}, T] \end{cases}, \quad (1)$$

где t_{ON} - момент времени, когда происходит переключение, T - период ШИМ. При работе схемы ключи VT1 и VT2 принимают следующие состояния:

$$t \in [0, t_{ON}]: VT1 \text{ замкнут } VT2 \text{ разомкнут}$$

$$t \in [t_{ON}, T]: VT1 \text{ разомкнут } VT2 \text{ замкнут}$$

Применив к подсхеме №1 на Рис.2 первый и второй законы Кирхгофа, запишем основные соотношения необходимые для дальнейших выкладок.

$$v(t) = d(t) \cdot v_1(t), \quad (2)$$

где $v(t)$ – мгновенное значение напряжения на ключе VT2, v_1 – напряжение входного источника.

$$v_L(t) = v(t) - v_2(t), \quad (3)$$

где v_L – мгновенное значение напряжения на индуктивности L , v_2 – напряжение источника подключенного к выходу.

$$i_1(t) = d(t) \cdot i_L(t), \quad (4)$$

где i_1 – мгновенное значение тока потребляемого от входного источника, i_L – ток через индуктивность L .

Для вывода математической модели подсистемы будем учитывать, что

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}.$$

Подставляя данное выражение в (3), а также учитывая выражение (2), представим математическую модель первого порядка для мгновенных значений в переменных состояния в виде:

$$\frac{d}{dt}i_L(t) = \frac{1}{L}d(t) \cdot v_1(t) - \frac{1}{L}v_2(t). \quad (5)$$

Произведя усреднение данной модели за период ШИМ [2], запишем её в следующем виде:

$$\frac{d}{dt}\langle i_L \rangle(t) = \frac{1}{L}\langle d \cdot v_1 \rangle(t) - \frac{1}{L}\langle v_2 \rangle(t). \quad (6)$$

Для дальнейших преобразований введём несколько допущений.

Допущение 1: напряжение v_1 - медленно меняется на периоде ШИМ. Из данного допущения, в соответствии с [2], следует

$$\langle d \cdot v_1 \rangle(t) = \langle d \rangle(t) \cdot \langle v_1 \rangle(t) \quad (7)$$

тогда уравнение (5) примет вид

$$\frac{d}{dt}\langle i_L \rangle(t) = \frac{1}{L}\langle d \rangle(t) \cdot \langle v_1 \rangle(t) - \frac{1}{L}\langle v_2 \rangle(t). \quad (8)$$

Определим дискретную модель, рассматривая переменные в дискретные моменты времени относительно периода коммутации T_0 :

$$\langle i_L \rangle[k] = i_L[k-1] + \frac{1}{L} \int_{(k-1) \cdot T_0}^{k \cdot T_0} (\langle d \rangle(t) \cdot \langle v_1 \rangle(t) - \langle v_2 \rangle(t)) dt \quad (9)$$

Допущение 2: напряжения v_1 и v_2 - медленно меняются на периоде дискретизации T_0 . Данное допущение приемлемо, так как в современных микропроцессорах легко реализуется частота дискретизации равная или в два раза выше частоты ШИМ. Допущение 2 позволяет рассматривать напряжения входящие в подынтегральное выражение (9) как константы, численно равные мгновенным значениям напряжения в конце $(k-1)$ -го такта. Таким образом, выражение (9) примет вид

$$\langle i_L \rangle[k] = i_L[k-1] + \frac{T_0}{L} (\langle d \rangle[k-1] \cdot \langle v_1 \rangle[k-1] - \langle v_2 \rangle[k-1]), \quad (10)$$

где T_0 – период дискретизации системы, k – номер отсчёта.

Выражение (10) является дискретной математической моделью, описывающей подсистему №1 в рамках принятых допущений 1 и 2.

Получение дискретной математической модели подсхемы №2.
Запишем модель для мгновенных значений, также в переменных состояния

$$\frac{d}{dt}v_C(t) = \frac{1}{C} \cdot i_1(t) - \frac{1}{C}i_2(t), \quad (11)$$

где $v_C(t)$ – мгновенное значение напряжения на ёмкости C , i_1 – суммарный входной ток подсхемы, $i_2(t)$ – ток нагрузки, которая представлена в виде источника тока.

Соответствующая усредненная за период ШИМ модель будет иметь вид

$$\frac{d}{dt}\langle v_C \rangle(t) = \frac{1}{C} \cdot \langle i_1 \rangle(t) - \frac{1}{C}\langle i_2 \rangle(t). \quad (12)$$

Дискретную модель в усреднённых переменных состояния запишем в виде:

$$\langle v_C \rangle[k] = v_C[k-1] + \frac{1}{C} \cdot \int_{(k-1) \cdot T_0}^{k \cdot T_0} (\langle i_1 \rangle(t) - \langle i_2 \rangle(t)) dt, \quad (13)$$

Допущение 3. Среднее значение токов i_1 и i_2 неизменно не периоде ШИМ и равно мгновенному значению токов в начале периода.

Данное допущение позволяет преобразовать выражение (13) к следующему виду:

$$\langle v_C \rangle[k] = v_C[k-1] + \frac{T_0}{C} \cdot (\langle i_1 \rangle[k-1] - \langle i_2 \rangle[k-1]), \quad (14)$$

Выражение (14) является усреднённой дискретной математической моделью, описывающей подсхему №2 в рамках допущения 3.

Усредненные дискретные математические модели рассматриваемых преобразователей в пространстве состояний. Получим уравнения движения в пространстве состояний для преобразователей представленных на Рис.1. Отметим, что уравнения выхода составляются в зависимости от выбранных выходных величин. Переменными состояния во всех случаях будут являться средний ток индуктивности L : $\langle i_L \rangle[k]$ и напряжение на емкости C : $\langle v_C \rangle[k]$. Внешними воздействиями являются управляющее воздействие $\langle d \rangle[k-1]$ и входное напряжение $\langle v_{IN} \rangle[k-1]$.

Приведем соответствие токов и напряжений в общих подсхемах (Рис.2) и схемах преобразователей (Рис. 1), в табл.1 и табл.2.

Подставим соответствующие для каждого из преобразователей значения токов и напряжений из табл.1 в выражение (10), получим для понижающего преобразователя

$$\langle i_L \rangle[k] = i_L[k-1] + \frac{T_0}{L} \langle d \rangle[k-1] \cdot \langle v_{IN} \rangle[k-1] - \langle v_{OUT} \rangle[k-1] \quad (15)$$

повышающего преобразователя

$$\langle i_L \rangle[k] = i_L[k-1] + \frac{T_0}{L} \langle d \rangle[k-1] \cdot \langle v_{OUT} \rangle[k-1] - \langle v_{IN} \rangle[k-1] \quad (16)$$

инвертирующего преобразователя

$$\langle i_L \rangle[k] = i_L[k-1] + \frac{T_0}{L} \langle d \rangle[k-1] \cdot (\langle v_{IN} \rangle[k-1] + \langle v_{OUT} \rangle[k-1]) - \langle v_{IN} \rangle[k-1] \quad (17)$$

Таблица 1

**Соответствие напряжений и токов общей подсистемы №1
соответствующим параметрам в схемах преобразователей (рис. 1)**

Рис. 2а	Понижающий	Повышающий	Инвертирующий
v_1	v_{IN}	v_{OUT}	$v_{IN} + v_{OUT}$
v_2	v_{OUT}	v_{IN}	v_{OUT}

Таблица 2

**Соответствие токов общей подсистемы №2 соответствующим
параметрам в схемах преобразователей (рис. 1)**

Рис. 2, б	Понижающий	Повышающий	Инвертирующий
i_1	i_L	$d \cdot i_L$	$(1-d) \cdot i_L$

Подставим соответствующие для каждого из преобразователей значения токов из табл.2 в выражение (14), получим для понижающего преобразователя

$$\langle v_C \rangle[k] = v_C[k-1] + \frac{T_0}{C} \cdot (\langle i_L \rangle[k] - \langle i_{OUT} \rangle[k]) \quad (18)$$

повышающего преобразователя

$$\langle v_C \rangle[k] = v_C[k-1] + \frac{T_0}{C} \cdot (\langle d \cdot i_L \rangle[k] - \langle i_{OUT} \rangle[k]) \quad (19)$$

инвертирующего преобразователя

$$\langle v_C \rangle[k] = v_C[k-1] + \frac{T_0}{C} \cdot (\langle (1-d) \cdot i_L \rangle[k] - \langle i_{OUT} \rangle[k]) \quad (20)$$

Допущение 4. Гармонические искажения тока индуктивности i_L являются незначительными.

Запишем результирующие дискретные математические модели для понижающего преобразователя

$$\begin{cases} \langle i_L \rangle[k] = i_L[k-1] + \frac{T_0}{L} \langle d \rangle[k-1] \cdot \langle v_{IN} \rangle[k-1] - \langle v_{OUT} \rangle[k-1] \\ \langle v_C \rangle[k] = v_C[k-1] + \frac{T_0}{C} \cdot (\langle i_L \rangle[k] - \langle i_{OUT} \rangle[k]) \end{cases} \quad (21)$$

повышающего преобразователя

$$\begin{cases} \langle i_L \rangle[k] = i_L[k-1] + \frac{T_0}{L} \langle d \rangle[k-1] \cdot \langle v_{OUT} \rangle[k-1] - \langle v_{IN} \rangle[k-1] \\ \langle v_C \rangle[k] = v_C[k-1] + \frac{T_0}{C} \cdot (\langle d \rangle[k] \cdot \langle i_L \rangle[k] - \langle i_{OUT} \rangle[k]) \end{cases} \quad (22)$$

инвертирующего преобразователя

$$\begin{cases} \langle i_L \rangle[k] = i_L[k-1] + \frac{T_0}{L} \langle d \rangle[k-1] \cdot (\langle v_{IN} \rangle[k-1] + \langle v_{OUT} \rangle[k-1]) - \langle v_{IN} \rangle[k-1] \\ \langle v_C \rangle[k] = v_C[k-1] + \frac{T_0}{C} \cdot ((1 - \langle d \rangle[k]) \cdot \langle i_L \rangle[k] - \langle i_{OUT} \rangle[k]) \end{cases} \quad (23)$$

Анализ точности дискретных математических моделей

Для исследования точности дискретных математических моделей рассматриваемых подсхем нужно произвести сравнение АЧХ и ФЧХ моделей и подсхем, которые этими моделями описываются. На основе сравнения АЧХ и ФЧХ схемы и её модели сделаем вывод о точности модели.

Произведём сравнение результатов моделирования подсхемы №1 и соответствующей ей модели (рис.3).

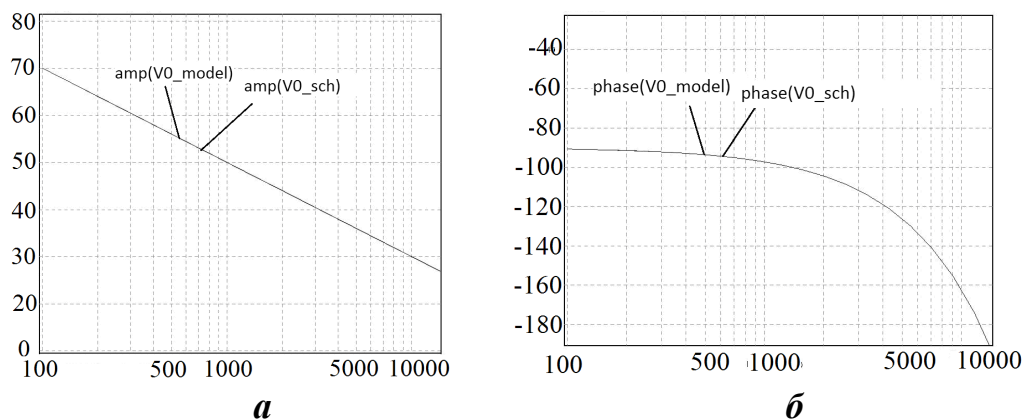


Рис. 3. Результаты моделирования подсхемы №1 и соответствующей ей модели: а – АЧХ; б – ФЧХ подсхемы №1 и её модели

Как видно из графиков, АЧХ и ФЧХ схемы и модели совпадают, что позволяет говорить о точности полученной модели в рамках указанных выше допущений.

В статье были предложены усреднённые дискретные математические модели однотактных импульсных преобразователей постоянного напряжения. Также были сформулированы несколько допущений о токах и напряжениях в моделируемых схемах, позволяющие вывести данные модели. Предложенные модели позволяют описывать поведение схем импульсных преобразователей и могут применяться при проектировании цифровых систем управления преобразователей. Однако при проектиро-

вании следует иметь в виду, что в реальных устройствах допущения, при которых справедливы модели, могут выполняться с той или иной точностью.

Список литературы

1. В.И. Мелешин. Транзисторная преобразовательная техника. Техносфера, 2005. 632 с.
2. Sanders, Seth R., Noworolski, J. M., Liu, Xiaojun Z., Verghese, George C, "Generalized Averaging Method for Power Conversion Circuits." IEEE Trans. Power Electron. Vol. 2. №. 2, 1991.
3. Hsu S., Brown A., Rensink L., Middlebrook R.D. Modeling and Analysis of Switching DC-to-DC Converters in Constant-Frequency Current-Programmed Mode // IEEE PESC Proceedings. 1979.
4. И.В.Капустин. «Разработка математической модели автономного инвертора с двойным преобразованием, как объекта управления промежуточным напряжением», Практическая силовая электроника №47 2012.

Катаев Роман Алексеевич, аспирант, kataev@shtyl.com, Россия, Тула, ЗАО «Ирбис-Т»

AVERAGED DISCRETE MATHEMATICAL MODELS OF SINGLE-ENDED PWM DC-DC CONVERTERS

R.A.Kataev

Proposed averaged discrete mathematical models of single-cycle pulse DC converters based on the representation of each of the transducers as a combination of some of typical units. Mathematical models of block types are also presented in the article. The analysis of the accuracy of the model is performed.

Keywords: averaged discrete mathematical model, pulse converter, the space of states, sampling, control system.

Kataev Roman Alekseevich, postgraduate, kataev@shtyl.com, Russia, Tula, JSC "Irbis-T"

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОНИЖАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПЕРЫВИСТОГО И НЕПРЕРЫВНОГО ТОКА

И.В. Капустин, Р.А. Катаев, Р.В. Блинов

Предложена математическая модель понижающего преобразователя напряжения для мгновенных значений сигналов, описывающая сразу оба режима работы - прерывистого и непрерывного тока, переход из одного режима в другой. Модель представлена в виде системы дифференциальных уравнений в пространстве состояний мгновенных значений параметров системы, а также в виде структурной схемы, которая может использоваться при компьютерном моделировании системы.

Ключевые слова: импульсный преобразователь напряжения, понижающий импульсный преобразователь, широтно-импульсная модуляция, ШИМ, математическая модель, пространство состояний, метод усреднения.

Импульсные преобразователи электрической энергии, позволяющие решать проблемы энергосбережения и повышения качества электроэнергии в широких масштабах, являются динамическими системами с периодически коммутируемыми параметрами. Регулирование и управление выходными электроэнергетическими параметрами осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) коммутирующих периодических импульсов. В течение периода коммутации схема преобразователя может несколько раз изменять свою структуру и иметь несколько интервалов непрерывности. При этом количество интервалов непрерывности зависит от режима работы и нагрузки преобразователя.

Обобщенная математическая модель преобразователя для целей управления должна отражать как статические свойства и регулировочные характеристики преобразователя независимо от режима работы, так и динамические свойства и характеристики, позволяющие проводить синтез замкнутых систем управления, адаптирующихся к текущему режиму работы и к переходу из одного режима в другой. На основе такой универсальной модели преобразователя возможно создание адаптивных систем управления, обеспечивающих работу при различных режимах, внешних условиях и широких диапазонах изменения нагрузки.

Современное состояние проблемы и цели работы. Созданию усредненных непрерывных моделей понижающего преобразователя (рис.1) посвящено большое количество отечественных и зарубежных работ [2-6]. При этом в большинстве из них рассматриваются непрерывные модели преобразователя только для одного режима непрерывных токов. В работах [2] и [3] построены и приведены два варианта непрерывных моделей понижающего преобразователя, отдельно для режимов непрерывного и пре-

рывистого тока, не отражающих динамические процессы перехода из одного режима в другой.

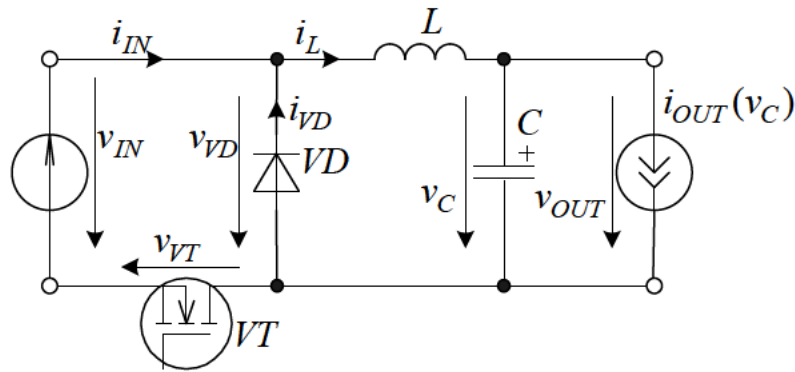


Рис. 1. Упрощенная схема понижающего преобразователя

Во многих практических случаях разработчики стремятся снизить габариты конечного изделия за счет снижения габаритов дросселя, что приводит к снижению его индуктивности L . Кроме этого, с целью снижения коммутационных потерь в ряде случаев имеет смысл занижать частоту коммутации f_S . Все это приводит к расширению границы прерывистого тока. Такой преобразователь работает вблизи граничного режима с частыми переходами из режима прерывистого тока в режим непрерывного тока и наоборот. При проектировании системы управления необходимо учитывать динамические и статические свойства преобразователя в обоих режимах, а также во время смены режима. Построение единой модели, описывающей оба режима, а также процессы перехода из одного режима в другой является целью данной работы.

Математическая модель понижающего преобразователя для мгновенных значений токов и напряжений. Построение математической модели понижающего преобразователя будем проводить в терминах пространства состояний, где в качестве переменных состояния рассматриваются мгновенные значения тока индуктивности $i_L(t)$ и напряжения емкости $v_C(t)$, которые являются непрерывными переменными. Для построения математической модели преобразователя в пространстве состояний определим, помимо переменных состояния, выходные управляемые переменные, возмущающие и управляющие воздействия.

Целью управления импульсным преобразователем является обеспечение устойчивой и надежной работы, достижение высоких эксплуатационных характеристик, которыми являются точность стабилизации и качество переходных процессов выходного напряжения $v_C(t)$, форма колебаний потребляемого среднего тока $i_{IN}(t)$, которые зависят непосредственно от системы управления. Поэтому управляемыми выходными переменными являются выходное напряжение $v_C(t)$ и потребляемый ток $i_{IN}(t)$.

На затвор транзисторного ключа VT поступают управляющие импульсы длительностью t_{ON} и периодом коммутации T_S , периодически открывающие транзистор, за счет изменения t_{ON} осуществляется управление преобразователем. Длительность открытого состояния транзисторного ключа на периоде коммутации - t_{ON} или ее относительное значение $t_{ON}/T_S = d_{ON}$, определяющее коэффициент заполнения управляющих импульсов, является управляющим воздействием.

Процесс управления происходит в условиях изменения входного напряжения $v_{IN}(t)$ и тока нагрузки $i_{OUT}(t)$, что определяет их как основные возмущения. В общем случае ток нагрузки может нелинейно зависеть от выходного напряжения, т.е. $i_{OUT}(t) = f(v_C(t))$.

Для упрощения результирующих зависимостей примем, что все элементы схемы преобразователя идеальны, а входное напряжение $v_{IN}(t)$ непрерывно и выше выходного напряжения $v_C(t)$. Согласно законам Кирхгофа, для схемы преобразователя (рис.1) запишем дифференциальные уравнения движения

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_L(t) = \frac{1}{L} \cdot v_{IN}(t) - \frac{1}{L} \cdot v_{VT}(t) - \frac{1}{L} \cdot v_C(t), \\ \frac{d}{dt} v_C(t) = \frac{1}{C} \cdot i_L(t) - \frac{1}{C} \cdot i_{OUT}(t), \end{cases} \quad (1)$$

и уравнения выхода

$$\begin{cases} i_{IN}(t) = i_L(t) - i_{VD}(t), \\ v_{OUT}(t) = v_C(t). \end{cases} \quad (2)$$

Приведенные системы уравнений (1) и (2) помимо переменных состояния ($i_L(t)$, $v_C(t)$) и внешних воздействий ($i_{OUT}(t)$, $v_{IN}(t)$) содержат импульсные переменные периодически коммутируемых элементов схемы - напряжение на транзисторном ключе $v_{VT}(t)$ и ток диода $i_{VD}(t)$, коммутация которых и определяет периодический характер электромагнитных процессов. Периодические колебания этих переменных зависят от переменных состояния, а также внешних и управляющих воздействий. Выразим их в соответствии с принципом работы преобразователя [1] и временными диаграммами мгновенных значений токов и напряжений (рис. 2) на элементах преобразователя.

Периодическая коммутация управляющими широтно-модулированными импульсами транзисторного ключа VT обуславливает периодический характер сигналов тока и напряжения на элементах схемы в установившемся режиме (рис. 2). В течение интервала управляющего импульса t_{ON} транзистор VT открыт $v_{VT}(t) = 0$, а диод VD закрыт $i_{VD}(t) = 0$, при этом осуществляется передача энергии от источника $v_{IN}(t)$

в конденсатор C и в нагрузку и одновременное накопление энергии в индуктивности L , ток индуктивности нарастает до максимального значения $i_{L\max}$.

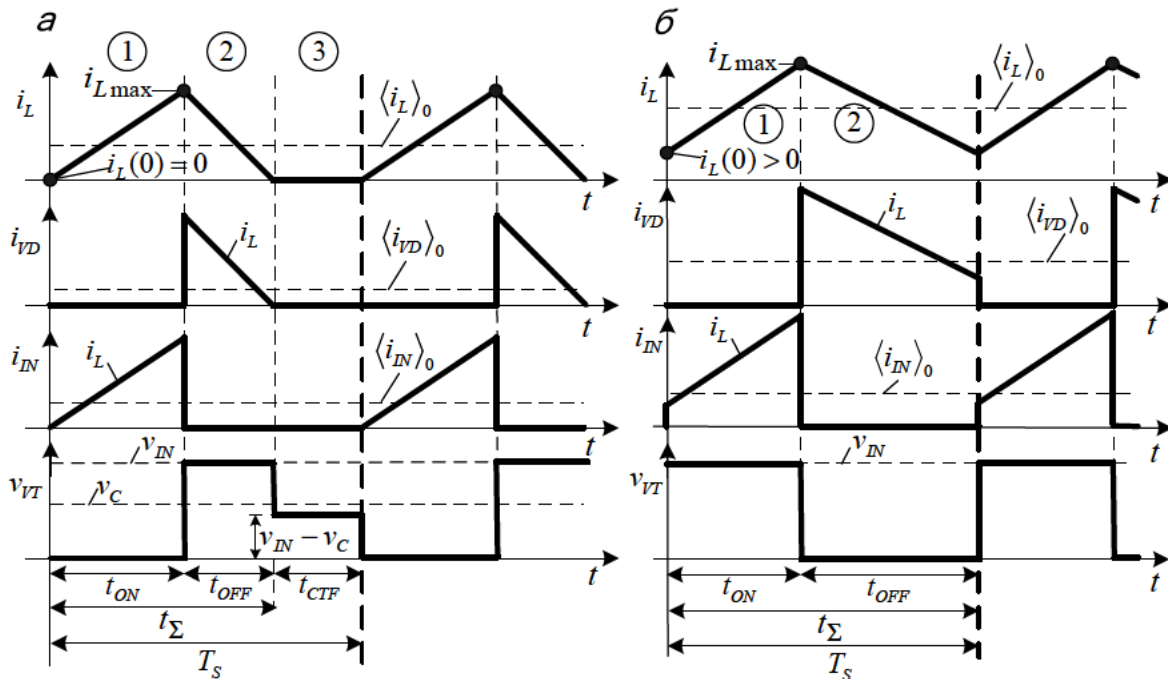


Рис. 2. Временные диаграммы токов и напряжений понижающего преобразователя: а – в режиме прерывистых; б – в режиме непрерывных токов

По окончании интервала импульса, транзистор VT закрывается $v_{VT}(t) = v_{IN}(t)$, наступает интервал паузы. На этом интервале осуществляется отдача энергии накопленной в индуктивности L в конденсатор C и в нагрузку, ток индуктивности убывает, замыкаясь через открывшийся диод VD . Ток диода определяется убывающим током индуктивности $i_{VD}(t) = i_L(t)$.

Длительность интервала паузы t_{OFF} в режиме прерывистого тока определяется временем снижения тока индуктивности от максимального значения до нуля. В режиме непрерывного тока, когда ток индуктивности не успевает снизиться до нуля к моменту окончания текущего периода коммутации, интервал паузы заканчивается только с началом нового периода. Диод VD , в зависимости от режима работы, закрывается либо вследствие спада тока индуктивности до нуля (рис. 2а), либо из-за начала нового такта коммутации (рис. 2б).

В режиме прерывистого тока по окончании интервала паузы наступает интервал отсечки (рис. 2а), который длится до конца периода ШИМ. При этом ток индуктивности остается равным нулю $i_L(t) = i_{VD}(t) = 0$, транзистор VT и диод VD закрыты $v_{VT}(t) = v_{IN}(t) - v_C(t)$. Конденсатор C раз-

ряжается током нагрузки. Длительность интервала отсечки t_{CTF} определяется от момента снижения тока индуктивности до нуля в конце интервала паузы до момента окончания периода коммутации. В режиме непрерывного тока интервал паузы длится до конца периода коммутации и длительность интервала отсечки снижается до нуля $t_{CTF} = 0$, т.е интервал отсечки отсутствует. В общем случае сумма всех интервалов непрерывности равна периоду коммутации $t_{ON} + t_{OFF} + t_{CTF} = T_S$.

В установившемся режиме токи и напряжения на элементах понижающего преобразователя являются периодическими функциями с частотой коммутации f_S (рис. 2), которая определяется частотой управляющих импульсов. При этом ток индуктивности $i_L(t)$, напряжение емкости $v_C(t)$ и входное напряжение $v_{IN}(t)$ являются непрерывными сигналами и не содержат разрывов. В свою очередь напряжение на транзисторном ключе $v_{VT}(t)$, входной ток $i_{IN}(t)$ и ток диода $i_{VD}(t)$, входящие в системы (1) и (2), импульсные разрывные функции времени, что обусловлено их коммутацией и наличием нескольких интервалов непрерывности t_{ON} , t_{OFF} и t_{CTF} . Точки разрыва соответствуют моментам переключения и смены интервалов непрерывности. Во время переходных режимов параметры этих периодических функций изменяются от периода к периоду.

Для того чтобы выразить разрывные напряжение на транзисторном ключе $v_{VT}(t)$ и ток диода $i_{VD}(t)$ через непрерывные переменные состояния, введем разрывные периодические коммутирующие функции, соответствующие интервалам непрерывности t_{ON} , t_{OFF} и t_{CTF} :

$$d_{ON}(t) = d_{ON}(t + T_S) = \begin{cases} 1, & t \in [0, t_{ON}], \\ 0, & t \in [t_{ON}, t_{ON} + t_{OFF}], \\ 0, & t \in [t_{ON} + t_{OFF}, T_S], \end{cases}$$

коммутирующая функции $d_{ON}(t)$ имеет единичное значение на интервале управляющего импульса и нулевое значение на интервалах паузы и отсечки на каждом периоде коммутации, она задает длительность управляющего импульса t_{ON} ;

$$d_{OFF}(t) = d_{OFF}(t + T_S) = \begin{cases} 0, & t \in [0, t_{OFF}], \\ 1, & t \in [t_{ON}, t_{ON} + t_{OFF}], \\ 0, & t \in [t_{ON} + t_{OFF}, T_S], \end{cases}$$

коммутирующая функция $d_{OFF}(t)$ имеет единичное значение на интервале паузы и нулевые значения на интервалах импульса и отсечки;

$$d_{CTF}(t) = d_{CTF}(t + T_S) = 1 - d_{ON}(t) - d_{OFF}(t) = \begin{cases} 0, & t \in [0, t_{OFF}], \\ 0, & t \in [t_{ON}, t_{ON} + t_{OFF}], \\ 1, & t \in [t_{ON} + t_{OFF}, T_S], \end{cases}$$

коммутирующая функция $d_{CTF}(t)$ имеет единичное значение на интервале отсечки, соответственно в режиме непрерывного тока она равна нулю на всем периоде коммутации.

В результате разрывные напряжение на транзисторном ключе $v_{VT}(t)$ и ток диода $i_{VD}(t)$ определяются как линейные комбинации произведений непрерывных переменных и коммутирующих функций

$$v_{VT}(t) = d_{OFF}(t) \cdot v_{IN}(t) + d_{CTF}(t) \cdot [v_{IN}(t) - v_C(t)], \quad (3)$$

$$i_{VD}(t) = [d_{OFF}(t) + d_{CTF}(t)] \cdot i_L(t). \quad (4)$$

Данные выражения описывают значения напряжения на транзисторе и тока диода на различных интервалах непрерывности и соответствуют процессам коммутации транзистора VT и диода VD, которые проиллюстрированы временными диаграммами на рис. 2. Подставим эти выражения (3), (4) в исходные системы уравнений для мгновенных значений токов и напряжений (1), (2) и получим уравнения движения в переменных состояниях, не содержащие промежуточных переменных коммутируемых элементов

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_L(t) = \frac{1}{L} \cdot d_{ON}(t) \cdot v_{IN}(t) - \frac{1}{L} \cdot d_{\Sigma}(t) \cdot v_C(t), \\ \frac{d}{dt} v_C(t) = \frac{1}{C} \cdot i_L(t) - \frac{1}{C} \cdot i_{OUT}(t), \end{cases} \quad (5)$$

и уравнения выхода

$$\begin{cases} i_{IN}(t) = d_{ON}(t) \cdot i_L(t), \\ v_{OUT}(t) = v_C(t). \end{cases} \quad (6)$$

В эти системы уравнений входит периодическая управляющая коммутирующая функция $d_{ON}(t)$, задающая длительность управляющего импульса, которая является управляющим воздействием, а также суммарная коммутирующая функция

$$d_{\Sigma}(t) = d_{ON}(t) + d_{OFF}(t),$$

соответствующая полному интервалу протекания тока индуктивности. Длительность этого интервала t_{Σ} (рис. 2) определяется интервалом времени, на котором ток индуктивности больше нуля, т.е. равна сумме длительностей интервалов управляющего импульса и паузы $t_{\Sigma} = t_{ON} + t_{OFF}$. Функция $d_{\Sigma}(t)$ в целом зависит от тока индуктивности $i_L(t)$ и имеет единичное значение, пока $i_L(t) > 0$ и равна нулю на интервале отсечки, т.е. когда $i_L(t) = 0$, что соответствует нелинейной ступенчатой функции

$$d_{\Sigma}(t) = d_{\Sigma}(i_L(t)) = \begin{cases} 1, & \text{если } i_L(t) > 0, \\ 0, & \text{если } i_L(t) \leq 0. \end{cases} \quad (7)$$

Полученные системы уравнений (5), (6) и выражение (7) для $d_{\Sigma}(t)$, представляют собой полную математическую модель преобразователя в пространстве состояний относительно мгновенных значений токов и напряжений, соответствующую схеме преобразователя (рис. 1). Используя эту модель, можно рассчитывать переходные процессы и установившиеся периодические функции колебаний мгновенных значений токов и напряжений преобразователя с помощью численных методов реализованных в математических пакетах, например, MathCAD, MathLab, Mathematica. Для удобства имитационного моделирования в таких пакетах как Simulink, MultiSim, PSim, VisSim и наглядности математическая модель представлена в виде структурной схемы на рис. 3.

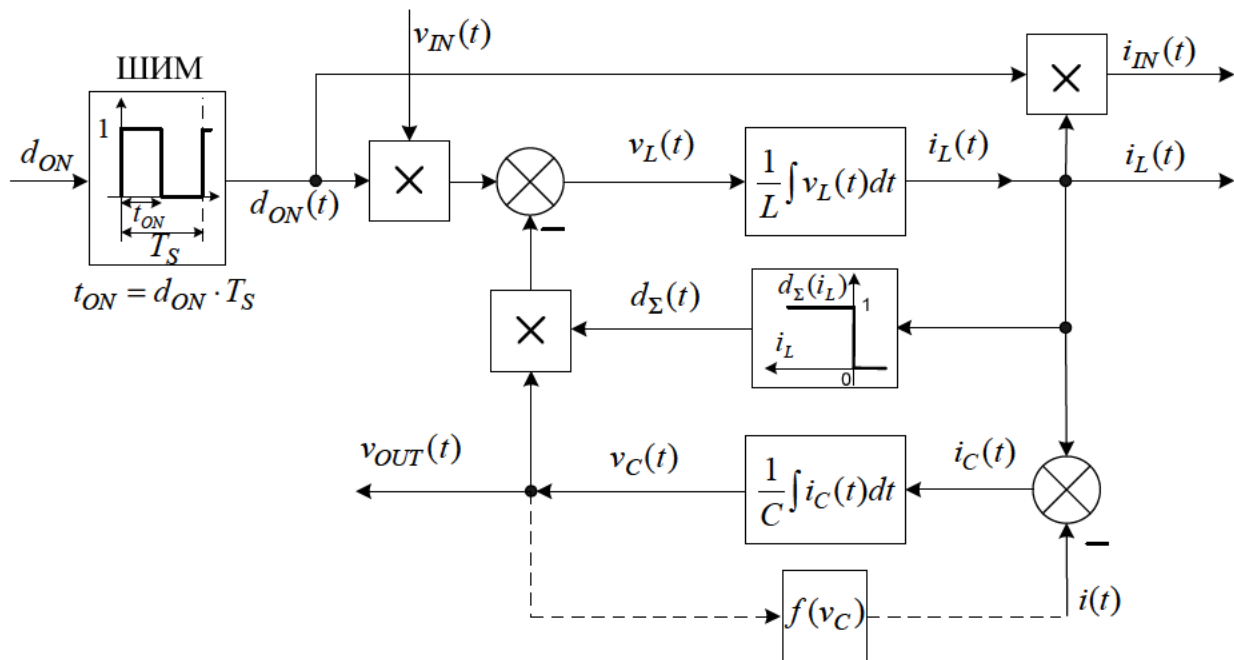


Рис. 3. Структурная схема модели понижающего преобразователя напряжения для мгновенных значений сигналов

Полученная математическая модель для мгновенных значений является основой для построения обобщённой усреднённой математической модели понижающего преобразователя напряжения.

Разработанная математическая модель понижающего преобразователя для мгновенных значений параметров позволяет рассчитывать переходные процессы и установившиеся периодические функции колебаний мгновенных значений токов и напряжений преобразователя с помощью численных методов реализованных в математических пакетах, например, MathCAD, MathLab, Mathematica.

Полученная модель в пространстве состояний относительно мгновенных значений тока дросселя и напряжения конденсатора представляет собой нелинейную динамическую систему с периодически коммутируемыми параметрами. Она является основой для построения обобщенной непрерывной математической модели в усредненных переменных состояния.

Список литературы

1. В.И. Мелешин. Транзисторная преобразовательная техника. Техносфера, 2005. 632 с.
2. В.И. Мелешин. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. Техносфера, 2011. 576 с.
3. Г. Белов Структурные динамические модели и частотный метод синтеза двухконтурных систем импульсными преобразователями. Силовая Электроника, № 3'2008.
4. Севернс Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания / пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. Четти П. Проектирование ключевых источников электропитания. М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Hsu S., Brown A., Rensink L., Middlebrook R. D. Modeling and Analysis of Switching DC-to-DC Converters in Constant-Frequency Current-Programmed Mode // IEEE PESC Proceedings. 1979.

Капустин Игорь Викторович, ведущий инженер, kataev@shtyl.com, Россия, Тула, ЗАО «Ирбис-Т»,

Катаев Роман Алексеевич, аспирант, kataev@shtyl.com, Россия, Тула, ЗАО «Ирбис-Т»,

Блинов Роман Вадимович, ведущий инженер, kataev@shtyl.com, Россия, Тула, ЗАО «Ирбис-Т»

THE MATHEMATICAL MODEL OF A STEP-DOWN VOLTAGE CONVERTER FOR THE INTERMITTENT AND CONTINUOUS CURRENT MODES

I.V. Kapustin, R.A. Kataev, R.V. Blinov

A generalized mathematical model of the step-down DC-DC converter as the control object is proposed. It describes both of the operating mode – intermittent and continuous current, the transition from one mode to another, model is obtained by using the generalized method of averaged state variables and describes the behavior of the average values of the electromagnetic processes, static and dynamic characteristics in any mode.

Key words: switching voltage converter, step-down switching converter, pulse-width modulation, mathematical model, the space of states, PWM, the averaging method.

Kapustin Igor Victorovich, leading engineer, JSC "Irbis-T", Russia, Tula, JSC "Irbis-T",

Kataev Roman Alekseevich, postgraduate student, engineer, kataev@shtyl.com, Russia, Tula, JSC "Irbis-T",

Blinov Roman Vadimovich, leading engineer, JSC "Irbis-T", Russia, Tula, JSC "Irbis-T"

УДК 669.017

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ В НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ БЕЙНИТНЫХ СТАЛЯХ

**Н.В. Мельниченко, А.В. Маляров, М.О. Мукосеева,
К.В. Коледенкова**

Приводятся особенности структурообразования при бейнитном превращении в низкоуглеродистых низколегированных сталях.

Ключевые слова: структура, бейнит, аустенит, феррит.

К сталям, используемым для производства деталей для газонефтепроводов, предъявляются повышенные требования. Высокие прочностные свойства невозможно получить без термической обработки. После упрочняющей термической обработки структура и свойства по сечению изделий толщиной от 18 до 32 мм не однородны. В поверхностных слоях может образовываться мартенсит, ниже по глубине - нижний бейнит, бейнитная структура зернистой морфологии (СЗМ) и феррит. Наиболее предпочтительна СЗМ как с точки зрения технологичности и свариваемости стали, так и ее надежности в эксплуатации [1 – 4]. СЗМ в большом количестве образуется при скорости охлаждения от 2 до 10 °С/с. Распад аустенита начинается по границам аустенитных зерен и распространяется к их центру. В отдельных зонах образуются участки аустенита с повышенной концентрацией углерода, приобретая вид островков. В процессе дальнейшего охлаждения часть участков распадается с образованием мартенсита, феррита и цементита или смеси их, а часть сохраняется до полного охлаждения стали. Зерна мезоферрита в основном имеют полиэдрическую форму и различаются размерами в зависимости от времени образования. Они в одних участках примыкают друг к другу, в других выглядят как островковые включения окруженные мартенситом, образовавшимся в процес-

се охлаждения [2].. Объем мартенсито-аустенитной (МА) составляющей с увеличением скорости охлаждения от 2 до 10 °С/с возрастает от 1 до 7 %, а затем снижается и при 18 °С/с составляет около 3 % [3]. По мнению автора крупные островки МА составляющей являются инициаторами зарождения хрупких трещин. Охрупчивание активизируется в случае охлаждения стали со скоростью 9 °С/с. В процессе приготовления шлифов из стали 05Г2МФБ на их поверхности, охлажденной приблизительно с такой же скоростью, обнаружено выкрошивание частиц округлой формы.

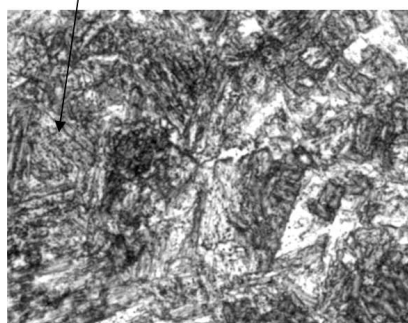
Таким образом, одна из причин охрупчивания стали – это образование структуры мартенсита в охлаждаемой стали из аустенитного состояния при небольшой скорости охлаждения, которая может быть инициатором зарождения хрупких трещин. Проблема охрупчивания стали при термической обработке на бейнит актуальна, так как зарождение микротрещин внутри стенки изделия снижает его надёжность и может привести к аварии.

Цель работы - изучение условий зарождения микротрещин в низкоуглеродистой низколегированной стали при распаде аустенита и формировании структуры зернистой морфологии.

Образцы размером 45 × 45 × 45 мм, изготовленные из стали 05Г2МФБ, подвергали предварительной обработке - нормализации. Нагрев под закалку до 930 °С с последующим подстуживанием до 800 °С проводили в электрической печи СШОЛ мощностью 5 квт фирмы МИУС. Охлаждение осуществляли в воде. Температуру измеряли приборами серии ТРМ научно-производственного объединения ОВЕН. Структуру изучали с применением металлографического микроскопа Neophot.

Металлографическими исследованиями установлено, что по глубине закаленной зоны располагаются мартенсит, бейнит игольчатой формы, далее структура бейнита в виде глобулей (СЗМ) и в центре заготовки преимущественно структура феррита. В зоне перехода от игольчатого бейнита к СЗМ, иглы бейнита не сплошные, а состоят из строчек частиц округлой формы (глобулей) размером ~ 5 мкм (рис. 1), повторяющих очертания игл.

Строчки округлой формы



x 1250 x 2

Рис. 1. Структура бейнита игольчатая.

В слое СЗМ, толщиной ~ 10 мм, глобулы формируются относительно произвольно. Форма их вытянутая. По границам глобул отчетливо видны темные включения. В верхней части этого слоя имеют место кратеры от выкрошенных микрообъемов округлой формы (рис. 2). Темные включения по границам глобул по нашему мнению могут состоять из мартенсита, который предопределяет охрупчивание стали. Крупные островки МА составляющей сосредоточенные в центре бывшего аустенитного зерна не являются инициаторами зарождения хрупких трещин. Они не могут активизировать охрупчивание стали в узком диапазоне скоростей охлаждения при формировании глобул бейнита с высокой плотностью распределения, т.к. образуются локально.

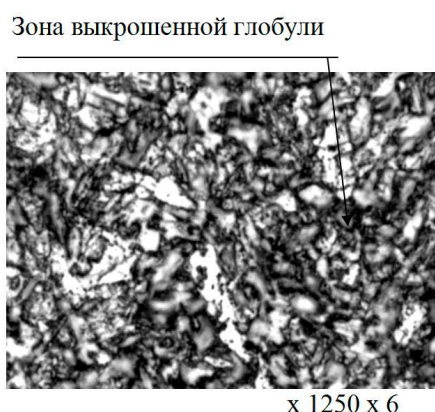


Рис. 2. Структура стали после охлаждения со скоростью ~ 9 °C/с.

Количество глобул по глубине слоя уменьшается и ближе к центру глобулы формируются в локальных зонах.

Количество зёрен феррита по глубине слоя, наоборот, возрастает, а их размер увеличивается. В центре заготовки он составляет ~ 10 мкм (рис. 3). Наряду с этим имеет место образование мелких зёрен феррита размером ~ 1 мкм.

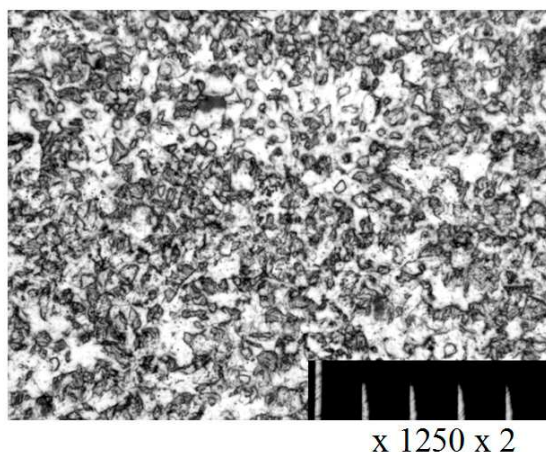


Рис. 3. Структура стали после охлаждения со скоростью ~ 6 °C/с

Для объяснения процессов, происходящих при распаде аустенита, использована модель формирования СЗМ (рис. 4), изложенная [2] и доработанная авторами.

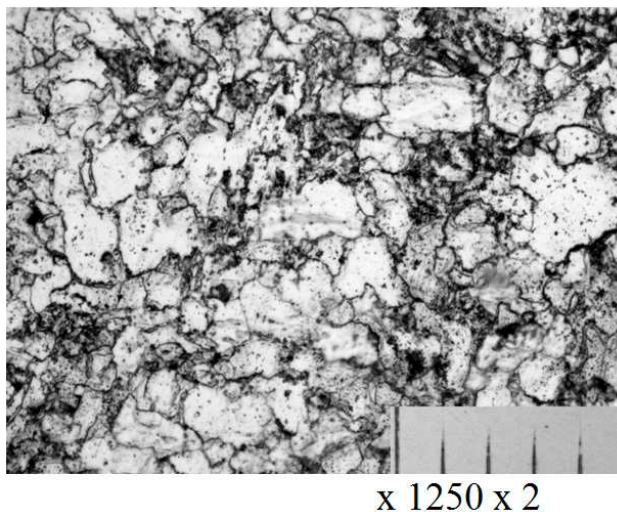


Рис. 4. Структура стали после охлаждения со скоростью $\sim 3^\circ\text{C/s}$

При скорости охлаждения около 9°C/s , когда образуется преимущественно СЗМ, глобулы зарождаются и растут на границах отдельных зёрен аустенита почти до соприкосновения друг с другом (рис. 2). Вокруг глобул образуется зона в виде тонкой прослойки переохлажденного аустенита обогащенного углеродом ($A_{\text{пер оу}}$), который при охлаждении до температуры закалки превращается в высокоуглеродистый мартенсит, способный к зарождению микротрещины и выкрошиванию глобулы. На рис. 2 эта зона выглядит как чёрная окантовка вокруг глобулы.

При скорости охлаждения менее 9°C/s число образовавшихся глобул уменьшается, расстояние между ними увеличивается (рис. 3), прослойка переохлажденного аустенита становится толще и менее обогащённой углеродом. Поэтому в ней не создаются условия для образования закалочных структур с высоким содержанием углерода.

В центре бывшего аустенитного зерна (рис. 6) $A_{\text{пер}}$, зажатый между глобулами, менее обогащён углеродом, поэтому распадается с образованием низкоуглеродистого мартенсита или сохраняется как $A_{\text{ост}}$.

Понижение скорости охлаждения до 3°C/s приводит к дальнейшему уменьшению количества глобул, они формируются только в отдельных зонах (рис. 4).

Когда скорость охлаждения стали становится $\sim 2^\circ\text{C/s}$ образовавшиеся глобулы бейнита по истечении некоторого времени распадаются, а $A_{\text{пер}}$, зажатый между глобулами, распадается на феррит и карбиды, образуя новые зерна. Размеры их одного порядка с размерами глобул СЗМ (рис. 5).

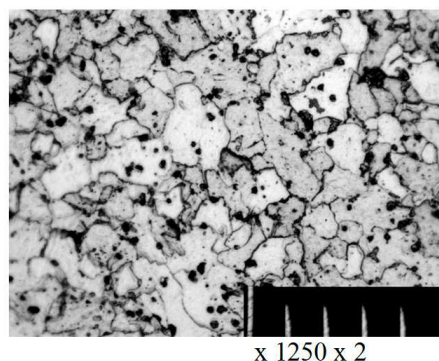


Рис. 5. Структура стали после охлаждения со скоростью $\sim 2^\circ\text{C/s}$

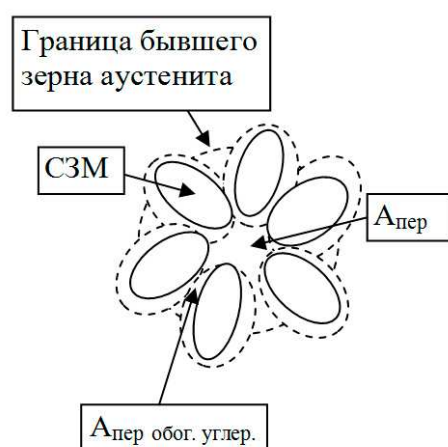


Рис. 6. Модель образования структуры зернистой морфологии

Таким образом, в центре бывшего аустенитного зерна при скорости охлаждения $\sim 9^\circ\text{C/s}$ между глобулами бейнита образуются закалочные структуры, а при более низких скоростях охлаждения условия для их образования уменьшаются и при скорости охлаждения ниже 2°C/s в этих зонах формируются зёрна феррита и карбиды. Разнозернистость структуры стали образуется в два этапа. Первый этап – при распаде аустенита и второй – при распаде аустенита переохлаждённого или закалочных структур зажатых между глобулами зернистого бейнита.

Вывод:

1. Получить доказательства существования прослойки мартенсита затруднительно, но с помощью модели можно объяснить причину охрупчивания стали при скорости охлаждения $\sim 9^\circ\text{C/s}$, так как при достижении определенной концентрации углерода в локальных микрообъемах по границам глобул может образовываться тонкая хрупкая прослойка высокоуглеродистого мартенсита, способствующая зарождению микротрещин.

2. Разнозернистость структуры в низкоуглеродистой низколегированной стали связана с формированием феррита при охлаждении с аусте-

нитного состояния в два этапа.

Список литературы

1. Чепрасов, Д.П. Исследование структуры низколегированных высокопрочных сталей / Д.П. Чепрасов, Е.А. Иванайский, А.А. Иванайский, К.С. Кровяков. // Тезисы докладов 6-ой международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств». Барнаул. Изд-во АлтГТУ. 2004. С. 31.

2. Свищенко В.В., Чепрасов Д.П., Иванайский А.А //Формирование в промежуточной области структур зернистой морфологии и некоторые вопросы терминологии. Барнаул. Изд-во АлтГТУ. Ползуновский альманах № 4, 2003. С.111.

3. Борякова, М.А. Смирнов // Труды IV-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур – ПРОСТ 2008». Москва: МИСиС, 2008. С. 203.

Мельниченко Николай Васильевич, канд. техн. наук, доц., Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Маляров Андрей Викторович, инженер, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Мукосеева Мария Олеговна, студентка, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Коledenкова Кристина Валерьевна, студентка, Россия, Тула, Тульский государственный университет

THE FEATURES OF STRUCTURE FORMATION DURING BANITIC TRANSFORMATION IN LOW CARBON LOW-ALLOYED STEELS ARE SHOWN

*N.V. Melnichenko, A.V. Painters, M.O. Mukoseeva,
K.V. Koledenkova*

The structure formation in low carbon steels during bainitic transformation

Key words: structure, bainite, austenite, ferrite

Melnichenko Nikolai Vasilievich, candidate of technical sciences, associate professor, Russia, Tula, Tula state University,

Painters Andrey Viktorovich, engineer, Russia, Tula, Tula state University

Mukoseeva Marija Olegovna, student, Russia, Tula, Tula state University,

Koledenkova Kristina Valerevna, student, Russia, Tula, Tula state University

ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

УДК 621.99

О ВОЗМОЖНОСТИ НАРЕЗАНИЯ РЕЗЬБЫ РЕЗЦАМИ С КЕРАМИЧЕСКИМИ ПЛАСТИНКАМИ

В.М. Грязев

Показаны перспективы применения режущей керамики для нарезания резьб на закаленных заготовках. Отмечено, что имеющейся рекламной информации недостаточно для применения керамики в промышленности и требуются дальнейшие исследования.

Ключевые слова: закаленная заготовка, резьба, керамическая пластина.

Нарезание резьбы является одним из первых процессов, для которых были созданы токарные станки, в частности с самоходным суппортом [1]. Кроме нарезания резьбы резцами известно множество прогрессивных способов формирования резьбы [2]. Однако нарезание резьб на термобработанных до высокой твердости заготовках осуществляется исключительно резбotoчением методом последовательных проходов. Обзор литературы показывает, что в настоящее время работы, посвященные нарезанию резьбы резцами, проводятся отечественными и зарубежными исследователями, но при этом используются твердосплавные пластины проверенных марок. Известен ряд работ, посвященных повышению стойкости твердосплавных резьбовых пластинок, например путем нанесения многослойных покрытий [3].

При нарезании резьбы на закаленных заготовках все ведущие мировые фирмы рекомендуют использовать твердосплавные пластинки с упорочняющим покрытием. Сменные многогранные неперетачиваемые пластинки (СМНП) выпускаются для нарезания различных типов резьб с полным и неполным профилем. Некоторые фирмы прилагают файлы программ для подбора типа пластины и режимов резания.

Отчет по подбору резьбового инструмента, проведенный по программе, разработанной немецким институтом Hoffmann Group - Институт Fraunhofer IWU машиностроения и обработки металла давлением Vargus Thread Turning Generator V-5.0.2, показал, что для нарезания резьбы М39х2 на стальных заготовках высокой твердости (HRC 52...55) рекомендуется

применение пластины 270708_2 (обозначение по методике Hoffmann Group) фирмы Vargus. [4].

Режимы резания представлены в табл. 1, а параметры схемы вырезания припуска в табл. 2.

Таблица 1

Режимы резания

Материал детали	Закалённая и отпущенная сталь 51-55HRc
Сплав пластины	HB7010
Скорость резания	45 м/мин
Число оборотов шпинделя	367
Количество проходов	11
Суммарное смещение по Z	11
Вид радиальной подачи	Изменяемый съём материала
Машинное время обработки	0 ' 27 "

Таблица 2

Глубина по проходам

Проход	Глубина, мм	Нак.глуб., мм	Суммарное смещение по Z, мм	D, мм
P1	0,213	0,213	0	38,575
P2	0,175	0,388	0	38,224
P3	0,161	0,549	0	37,903
P4	0,123	0,672	0	37,656
P5	0,104	0,776	0	37,448
P6	0,092	0,868	0	37,265
P7	0,083	0,950	0	37,099
P8	0,076	1,026	0	36,947
P9	0,071	1,097	0	36,805
P10	0,067	1,164	0	36,672
P11	0,063	1,227	0	36,546

**Примечание: глубина резания дана на радиус детали.*

В настоящее время любому, даже самому небольшому предприятию в России доступны инструменты любых зарубежных фирм. В 80-х годах прошлого века, когда СССР столкнулся с дефицитом вольфрама для производства режущего инструмента, в стране развернулись опытно-конструкторские и научно-исследовательские работы по замене вольфрамсодержащих инструментальных материалов на безвольфрамовые. При этом даже в пособиях по токарной обработке для профтехучилищ [5] указыва-

лось на возможность нарезания резьб на твердых заготовках при помощи пластин из режущей керамики.

Керамические пластинки обладают значительно большей красностойкостью и твердостью, чем твердосплавные металлокерамические, однако имеют меньшую пластичность и изгибную прочность, т.е. они более хрупки [6]. Высокая твердость основы и ее тугоплавкость предопределяет хорошие режущие свойства керамики, однако изгибная прочность оксидной керамики находится на низком уровне (250-350 Н/мм²). Прочность керамики увеличивают добавлением карбидов металлов, в частности карбида титана (так называемая черная керамика). При этом прочность на изгиб увеличивается до 700-750 Н/мм².

ГОСТ 25003-81 «Пластины режущие сменные многогранные керамические. Технические условия» предусматривает изготовление резьбовых пластин (Пластины трехгранной формы с задним углом 7° типоразмеров 01211 TNUN и 01231 TNGN).

Однако полный обзор по патентной базе «<http://bankpatentov.ru/featured?>» не дает сведений о применении керамических пластинок для нарезания резьбы. В большом патентном обзоре удалось найти только 2 патента, касающихся керамических пластин [7] и [8], в которых описывается улучшенная геометрия режущей части и сэндвич-спеченную пластинку для повышения прочности керамической части на изгиб. Кстати китайская фирма ZCC-CT, корейская Taegu Тес и японская TUNGALOY выпускают керамические режущие пластинки на основе Al₂O₃. Из описания приведенных патентов не видно, что рассматриваемые пластины предназначены, в том числе, и для нарезания резьбы. В японском патенте все приведенные примеры касаются только точения гладких валов. В процессе библиографического поиска были найдены статьи [9, 10], в которых говорится о некоторых экспериментальных данных по нарезанию резьбы на термобработанных до твердости 52-55 HRC заготовках резцами, оснащенными пластинами из режущей керамики BOK 60.

Завод технической керамики (ООО «Завод технической керамики» <http://www.techceram.ru/coord/>) выпускает серийно пластинки из керамики марок: ЦМ-332, ВО-13, ВО-130, ВО-18, ВО-180, ВОК-60, ВОК-63, ВОК-71, ВОК-200, ВОК-95С, ВОКС-300, ТВИН-200, ТВИН-400. В настоящее время этот завод преимущественно выпускает вместо керамики ВОК-60 пластинки из керамики ВОК-200, обладающие более высокими эксплуатационными свойствами. В табл. 3 приведены физико-механические свойства некоторых марок керамики в сравнении с металлокерамическим сплавом Т15К6 наиболее часто применяемым для нарезания резьбы.

Керамика марки ВОКС-300, как видно из табл. 3., обладает повышенной прочностью на изгиб, приближающейся к прочности металлокерамического сплава Т15К6, и рекомендуется заводом, в том числе и для нарезания резьбы.

Повышенная прочность керамики ВОКС-300 объясняется тем, что это композиционный материал, состоящий из высокопрочной твердосплавной подложки и одного или нескольких слоев керамического режущего материала. Данная конструкция позволяет получить более высокую прочность на изгиб и более высокую вязкость. Одновременно также повышается ударная прочность и термостойкость.

Таблица 3

Физико-механические свойства керамики различных марок

Марка	Группа	Плотность, г/см ³	Твердость, HRA	Предел прочности при изгибе, МПа
ВОК-71 (ВОК-60)	II	4,20-4,30	93	637
ВОК-200		4,20-4,30	93	650
ВОКС-300	III	4,25	93	950
T15K6		11,1-11,6	90	1176

Однако завод не дает рекомендаций по рациональной геометрии пластинок. Рекомендуются лишь рекомендации по скорости резания (до 170 м/мин при точении закаленной, в том числе инструментальной стали). Очевидно, что для расширения рекомендаций предприятия необходимо провести комплексные исследования эксплуатационных характеристик новых сплавов и создать методику, желательно автоматизированную, выбора материала пластинки для нарезания резьбы на твердых заготовках и режимов резания, включая и выбор схемы вырезания припуска из резьбовой впадины.

Список литературы

1. Ямников А.С., Маликов А.А. История развития технологической науки: учебное пособие. Изд. 2, испр. и доп. /Тула: Изд-во ТулГУ, 2013, 424 с.
2. Прогрессивные технологии резьбообработки: учеб. пособие / Ямников А.С., Маликов А.А., Ямникова О.А. [и др.] / под ред. А.С. Ямникова. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. 293 с.
3. Сагитов Д.И. Повышение работоспособности токарных резьбовых резцов путем разработки и применения многослойных износостойких покрытий: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / Ульяновск, 2012. 196 с.
4. Vargus. Каталог токарного резьбонарезного инструмента. [Электронный ресурс] /URL: <http://www.its77.ru/katalogi-proizvoditelej/vargus->

instrument-rezbonareznoj/vargus.html.

5. Фещенко В.Н., Махмутов Р.Х. Токарная обработка: учебное пособие для сред. проф. - техн. училищ. М.: Высш. шк., 1984. 288 с.

6. Залого В.А. Курс лекций «Инструментальные материалы для лезвийных инструментов»: учебное пособие / В.А. Залого / Сумы. Изд-во СумГУ. 2007. 206 с.

7. Патент на полезную модель №: 110015 МПК: В23С. Режущая пластина из керамики / Кузин В.В., Федоров С.Ю., Федоров М.Ю. Дата публикации: 10 ноября 2011.

8. Патент на изобретение №: 2104826 МПК: В23В. Режущая пластина из спеченного изделия и способ ее изготовления / Сумитомо Электрик Индастриз, Лтд (JP). Дата публикации: 20 февраля 1998.

9. Денисов В.Г., Федин Е.И., Ямников А.С. Влияние геометрии резбовых резцов с режущей керамикой на точность профиля резьбы и силы резания / Сб. науч. тр. «Исследования в области технологии механической обработки и сборки». Тула: ТПИ, 1985. С. 69-75.

10. Федин Е.И., Денисов В.Г., Соловьева Л.Г. Оптимизация задних углов резбовых резцов из режущей керамики. Сб. научн. тр.: «Исследования в области инструментального производства и обработки металлов резанием». Тула: ТПИ, 1983. С. 128-132.

Грязев Василий Михайлович, магистрант. tms@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ABOUT POSSIBILITY OF CUTTING OF THE CARVING CUTTERS WITH CERAMIC PLATES

V.M. Gryazev

Prospects of use of cutting ceramics for cutting of carvings on the tempered preparations are shown. It is noted that available advertizing information hasn't enough for use of ceramics in the industry and further researches are required.

Key words: the tempered preparation, carving, ceramic plate.

Gryazev Vasily Mikhaylovich, undergraduate, tms@tsu.tula.ru, Russian, Tula, Tula state university

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.932

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ФРАКТАЛЬНОГО КОДИРОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА LBP (LOCAL BINARY PATTERNS) ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

С.К. Карцов, Д.Ю. Куприянов, А.Н. Зыков

Настоящая статья включает в себя анализ и применение метода LBP (Local Binary Patterns) для фрактального кодирования изображения. В основе метода LBP лежит модель, описывающая окрестности элементов изображения с помощью двоичных кодов. Этот метод применяется для исследования их локальных свойств и выявления эффективных характеристик отдельных частей изображения для его последующего сжатия.

Ключевые слова: фрактальное кодирование изображения, сжатие информации, метод LBP (Local Binary Patterns).

В настоящее время, с резким ростом информационных потоков, становится актуальной задача хранения и передачи цифровой информации. При этом значительную долю объема этой информации занимают графические цифровые изображения. В результате размер хранилищ, а также пропускная способность сетей передачи данных увеличивается. Возникает дилемма: чем большая емкость и пропускная способность обеспечивается инженерами, тем более высокие требования предъявляются к техническому обеспечению пользователей. Поэтому проблема организации эффективного хранения и передачи графической информации становится достаточно значимой, а вместе с ней приобретает важность разработка эффективных методов, алгоритмов и технологий сжатия графической информации.

Анализ классических методов фрактального кодирования изображения. Фрактальное кодирование изображений [1] является одним из наиболее эффективных на сегодняшний день методов сжатия информации с потерями и, как следствие, достаточно перспективным для использования при разработке компьютерных мультимедиа приложений и обработке цифрового видео. Оно отличается как высокой степенью сжатия, сравнимой со степенью сжатия других известных современных методов кодирования (например, JPEG), так и скоростью восстановления изображения, ко-

торая у этого алгоритма значительно выше. При этом математическое описание изображения, как результат фрактального кодирования, позволяет восстановить изображение любого размера без каких-либо значительных масштабных искажений, которые свойственны другим методам кодирования. Однако, алгоритм фрактального кодирования обладает и недостатками. Основным среди них является большая вычислительная сложность этапа кодирования изображения.

Фрактальное кодирование изображения подразумевает нахождение множества сжимающих преобразований, которые отображают доменные блоки во множество ранговых блоков (рис. 1). Ранговые блоки покрывают всё изображение. При этом они могут быть как фиксированного, так и переменного размера, если используется построение с помощью адаптивного разбиения.

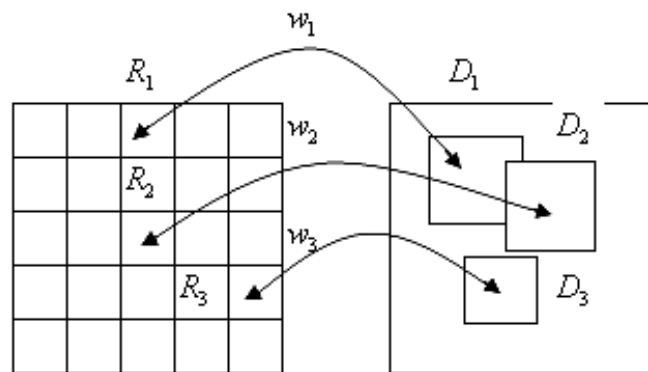


Рис. 1. Отображение ранговых блоков в доменные блоки

Рассмотрим базовый алгоритм фрактального кодирования изображений. Изображение I разбивается на прямоугольные ранговые блоки R_i таким образом, что ранговые блоки не пересекаются, но при этом покрывают всё изображение. Далее изображение I покрывается множеством доменных блоков D_i . Доменные блоки могут пересекаться и иметь разный размер, а их количество может достигать сотен или тысяч единиц. После построений, для каждого рангового блока R_i необходимо найти сжимающее аффинное преобразование w_i , которое наилучшим образом аппроксимирует доменный блок D_i . В общем случае, аффинное преобразование может включать в себя *сдвиг*, *поворот* и *масштабирование*, а для того чтобы оно было сжимающим, размеры доменной области должны превышать размеры ранговой области. Параметры преобразования необходимо сохранять для последующего восстановления рангового блока.

Степень сжатия изображения зависит от отображения доменных блоков в ранговые. Поиск наилучшего отображения требует больших вычислительных затрат, для сокращения которых в настоящее время исполь-

зуют несколько подходов увеличения скорости кодирования. Первый подход заключается в том, чтобы классифицировать домены, что в свою очередь позволяет значительно уменьшить множество используемых доменов, среди которых ведется поиск. Второй подход заключается в поиске определенных характеристических особенностей, с помощью которых можно оценивать доменные и ранговые области. Использование этих оценочных характеристик для сравнения доменных и ранговых блоков, взамен их по-пиксельного сравнения, позволяет ускорить процесс фрактального кодирования за счет существенного сокращения объема вычислений. При этом сами характеристики могут быть получены на основе спектрального анализа Фурье, вейвлет-анализа или показателей оттенков и цветового представления изображения.

Применение метода LBP для кодирования изображения. Текстуристый анализ изображений является одним из наиболее используемых методов при реализации компьютерного зрения и распознавания образов. Обычно под текстурой изображения понимают распределение спектральной яркости (тона, цвета), обусловленное взаимным расположением неоднородных по спектральной яркости образующих изображение элементов. Текстура отображает внутреннее строение изображения, а также взаимное расположение образующих его элементов, и, таким образом, является важной характеристикой изображения. Существующие методы анализа текстуры в целом можно разделить на три категории: статистические, спектральные и структурные методы. Текстура со структурной точки зрения состоит из элементов, которые организованы в соответствии с определенными правилами размещения.

Метод двоичных локальных шаблонов (LBP - Local Binary Patterns) используется для анализа текстуры изображения при фрактальном кодировании изображения и представляет собой комбинацию статистических и структурных методов. Впервые этот метод был предложен Т.Оjala, М.Рietikanen, Т.Маehpaa [2] и после получил развитие в работах [3, 4]. Он является теоретически простым и одновременно эффективным методом, показывающим хорошие результаты во многих эмпирических исследованиях. Кроме того, метод инвариантен к монотонным полутоновым преобразованиям и, следовательно, может быть менее чувствительным к изменениям освещенности. Текстура, с точки зрения метода LBP, описывается микро-примитивами (textons) и статистикой их размещения. В основе метода лежат двоичные шаблоны областей размера 3×3 , которые являются непараметрическими ядрами, суммирующими локальную пространственную структуру изображения.

Рассмотрим алгоритм метода LBP. Для каждого пикселя изображения выделим окрестность размера 3×3 (рис. 2). Создадим матрицу значений, в которой для всех соседних по отношению к центральному пикселям, имеющих значение интенсивности большее или равное чем значение ин-

тенсивности центрального пикселя, положим значение 1, а в противном случае - значение 0. Затем, последовательно по часовой стрелке запишем двоичное число, состоящее из цифр соседних к центральному пикселю. Это двоичное число (или его десятичный эквивалент) называется LBP-кодом центрального пикселя и, далее, используется как характеристика выбранной локальной текстуры.

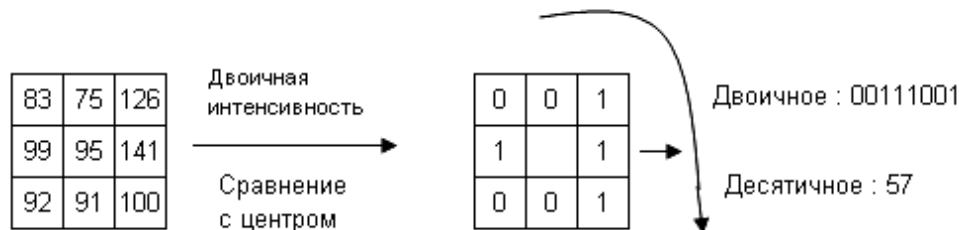


Рис. 2. Вычисление оригинального LBP кода

Десятичная форма полученного 8-битного слова (LBP-кода) для пикселя с координатами (x_c, y_c) может быть выражена следующим образом:

$$LBP(x_c, y_c) = \sum_{n=0}^7 s(i_n - i_c) 2^n, \quad (1)$$

где i_c - значение интенсивности центрального пикселя (x_c, y_c) , i_n - значение интенсивности соседнего пикселя с индексом n , а функция $s(x)$ - пороговая функция, которая определена так:

$$s(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \geq 0 \\ 0 & \text{if } x < 0. \end{cases} \quad (2)$$

На практике LBP-код может быть истолкован как индекс ядра структуры изображения. Следует отметить, что оператор LBP не зависит от любого монотонного полутонного преобразования, которое сохраняет порядок интенсивности пикселя в локальной области.

Экспериментальные исследования. Возьмем изображение и вычислим LBP-код для каждого его пикселя. Для крайних и угловых пикселей значение недостающих внешних пикселей можно принять равным нулю. Получим матрицу размера соответствующего размеру исходного изображения, где вместо значений интенсивности пикселей будут находиться вычисленные их LBP-коды. Необходимо отметить, что LBP-код чувствителен к вращению (рис 3.), а именно, выбор порядка соседних пикселей, участвующих в формировании LBP-кода, определяет его значение и играет не последнюю роль при реализации метода. Для того, чтобы сделать данный код инвариантным к вращению, можно в качестве LBP-кода использовать максимальное, минимальное или среднее значение среди всех возможных вариантов для конкретного пикселя. Полученная матрица описы-

вает ранговые области.

0	0	1	00111111=63	11110011=243
1		1	01111110=126	11100111=231
			11111100=252	11001111=207
1	1	1	11111001=249	10011111=159

Рис 3. Варианты формирования LBP-кода в зависимости от порядка выбора соседей

Уменьшим исходное изображение в два раза и вычислим его LBP-код. Получим новую матрицу значений LBP-кодов, размер которой будет в два раза меньше размера предыдущей матрицы. Новая матрица описывает доменные области. Далее, перебирая значения из ранговой матрицы, находим эквивалентные им значения в доменной матрице. Процедура поиска эквивалентных значений соответствует поиску подобных областей на исходном и уменьшенном изображениях. Таким образом, находятся ранговые и доменные области, а также устанавливаются соответствия между ними. Необходимо отметить, что поскольку доменная матрица характеризует уменьшенное в два раза исходное изображение, то значения LBP-кодов, находящихся в этой матрице, в свою очередь, наоборот, характеризуют области, которые в два раза превосходят по размеру свои исходные образы.

Экспериментальные исследования показали, что применение метода LBP позволяет значительно сократить временные и вычислительные расходы при фрактальном кодировании изображений. Среди преимуществ метода LBP можно выделить такие, как вычислительная простота, эффективность и универсальность. Метод LBP может применяться для классификации текстур полутоновых изображений и инвариантен к масштабированию.

Список литературы

1. Barnsley, M., and L. Hurd. 1993. Fractal Image Compression, Wellesley, MA: A.K.Peters, Ltd.
2. Ojala, T., Pietikainen, M., Maenpaa, T. "Multi resolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns." IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. 24, № 7, 2002. P. 971–987.
3. Ahonen T., Hadid A. and Pietikainen M., "Face recognition with local binary patterns," in Proc. Euro. Conf. Comput. Vis., 2004. P. 469–481.

4. Takala V., Ahonen T., Pietikainen M. "Block-based methods for image retrieval using local binary patterns", Scandinavian Conference on Image Analysis, Joensuu, Finland, 2005. P. 882–891.

Карцов Сергей Константинович, д-р техн. наук, проф., kartsov@yandex.ru, Россия, Москва, Московский государственный индустриальный университет,

Куприянов Дмитрий Юрьевич, канд. техн. наук, доц., kartsov@yandex.ru, Россия, Москва, Московский государственный индустриальный университет,

Зыков Алексей Николаевич, аспирант, kartsov@yandex.ru, Россия, Москва, Московский государственный индустриальный университет

**THE ANALYSIS AND APPLICATION OF METHOD LBP (LOCAL BINARY PATTERNS)
FOR FRACTAL IMAGE CODINGS**

S.K. Kartsov, D.Yu. Kupriajnov, A.N.Zykov

Present article represents the analysis and application of method LBP (Local Binary Patterns) for fractal image codings. Being based on local binary model, LBP it is applied to research of local properties of a structure of the image, being its effective characteristic.

Key words: fractal image coding, compression of the information, method LBP (Local Binary Patterns).

Kartsov Sergey Konstantinovich, doctor of technical science, professor, kartsov@yandex.ru, Russia, Moscow, Moscow State Industrial University,

Kupriajnov Dmitry Yurevich, candidate of technical science, docent, kupri-ov@msiu.ru, Russia, Moscow, Moscow State Industrial University,

Zykov Aleksey Nikolaevich, postgraduate, kupri-ov@msiu.ru, Russia, Moscow, Moscow State Industrial University

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧЕВЫХ КОМАНД НА ФОНЕ ШУМОВ

Ч.Т. Нгуен

Рассмотрена задача распознавания речевых команд на фоне шумов. Для улучшения качества распознавания речевых сигналов предложено применить эвристический прием, заключающийся в увеличении значений отсчетов амплитудных спектров речевых сигналов на некоторую константу. Приведены результаты экспериментов.

Ключевые слова: амплитудный спектр, распознавание речи, аддитивный белый гауссовский шум, идентификация, модель речевого сигнала.

Система распознавания речевых команд, обученная на эталонах речевых сигналов своего диктора, устойчиво распознаёт речевые команды, произнесенные этим диктором. Когда другой диктор тестирует такую систему, результат распознавания часто оказывается неприемлемым. Такой результат объясняется тем, что спектры сигналов чужого диктора сильно отличаются от спектров сигналов своего диктора, на который настроена система. В работе [1] было предложено устранить различие спектров сигналов чужого и своего дикторов путём преобразования спектра речевого сигнала чужого диктора к спектру речевого сигнала своего диктора.

В данной статье рассматривается другая проблема, не затрагивающая задачи устранения различия спектров чужого и своего дикторов. На практике результат распознавания сигналов как своего, так и чужого дикторов дополнительно ухудшается шумом. Обучающие речевые сигналы обычно являются незашумленными, а тестирующие речевые сигналы оказываются зашумленными. Присутствие шума приводит к сильному отклонению спектров тестирующих речевых сигналов от спектров их эталонов в обучающей выборке. Поэтому качество результата распознавания на фоне шумов резко падает.

Для уменьшения отклонений спектров тестирующих зашумленных речевых сигналов от спектров их незашумленных эталонов в обучающей выборке были предложены разные способы [2-4]. Самый популярный подход – это удаление из спектров зашумленных сигналов шумовой составляющей. Такой подход реализован в методе спектрального вычитания (spectral subtraction) [2] и методе фильтрации Вейнера (Weiner filtering) [3]. Недостаток этих методов заключается в том, что перед удалением шума из спектров речевых сигналов должна быть известна априорная информация о шуме. Сам процесс выявления априорной информации о шуме вызывает трудности. Кроме того, если шум нестационарный, то его удаление сильно искажает спектр исходного сигнала, а в худшем случае нарушает формантную структуру его спектра.

Существует и другой подход. В работе [4] был предложен метод, заключающийся в умножении значений отсчетов амплитудного спектра фрагментов каждого речевого сигнала на весовой параметр. Цель этого метода – подчеркнуть спектральное различие между речевыми и неречевыми (паузы) фрагментами сигнала. Этот метод был предложен для распознавания слитной речи. Для задачи распознавания отдельных речевых команд этот метод не подходит.

Если спектр зашумленного сигнала сильно отличается от спектра незашумленного сигнала, то очевидно, что степень связи таких спектров может оказаться достаточно малой. Для увеличения степени связи в данной работе предлагается увеличивать значения отсчетов амплитудных спектров обоих сигналов на константу.

Таким образом, предлагается решать задачу распознавания речевых команд на фоне шумов в три этапа.

Идентификация. Предположив, что модель речевого сигнала – это последовательность его кратковременных амплитудных спектров, следует оценить их значения для заданного речевого сигнала.

Генерация. Сразу заметим, что на данном этапе, в отличие от [1], не происходит преобразования полученных спектров сигналов чужого диктора к спектрам сигналов своего диктора. Значения отсчетов кратковременных амплитудных спектров речевого сигнала только увеличиваются на константу. Такую модель речевого сигнала назовем *моделью с усилением*.

Адекватное восприятие. В роли воспринимающего и интерпретирующего устройства выступает система распознавания речевых команд. Эта система теперь обучается с помощью моделей с усилением незашумленных речевых сигналов для того, чтобы эксплуатироваться на моделях с усилением зашумленных речевых сигналов. Будем считать, что восприятие речевого сигнала является адекватным, если он правильно распознается системой.

Таким образом, в данной работе изучается только уменьшение влияния шума на качество распознавания сигнала диктора, независимо от того, свой это диктор или чужой.

Рассмотрим этапы решения задачи распознавания сигнала.

Пусть сигнал $Y = \{y_1, \dots, y_T\}$ означает произношение какой-то речевой команды, где T – целое, положительное. Отсчеты $y_t, t = 1, \dots, T$ принимают вещественные значения.

Разбиение речевого сигнала на фрагменты. Дискретные отсчеты речевого сигнала обрабатываются фрагментами с определенным периодом L . Фрагменты имеют длину N – количество отсчетов речевого сигнала во фрагменте. Формально i -й фрагмент представлен следующим описанием:

$$Y_{t_i}^{t_i+N-1} = \{y_t; t_i \leq t \leq t_i + N - 1\}, 1 \leq t_i \leq T - N + 1, L = t_{i+1} - t_i.$$

Разбиение исходного сигнала на фрагменты основано на представлении о речи как о квазистационарном процессе, поведение которого остается относительно неизменными в течение короткого периода времени. Это позволяет разделить сигнал на порции, в пределах которых можно считать сигнал стационарным [5].

Кратковременный спектр речевого сигнала. Для каждого фрагмента речевого сигнала строится его кратковременный спектр. Спектр включает в себя фазовый и амплитудный спектры. Как и в [1], предполагается, что система распознавания речевых команд использует в качестве признаков последовательность векторов Мел-частотных кепстральных коэффициентов, являющихся результатом дискретного косинусного преобразования от логарифма кратковременного амплитудного спектра речевого сигнала, распределенного по Мел-шкале [6] без фазовой составляющей спектра. Удобно считать последовательность кратковременных амплитудных спектров $A = \{A_1, A_2, A_3, \dots\}$ моделью речевого сигнала Y , где амплитудный спектр A_i представляет собой вектор отсчетов $A_i = \{A_i^k\}$. Отсчеты амплитудного спектра определяются дискретным преобразованием Фурье i -ого фрагмента речевого сигнала Y :

$$A_i^k = \left| \sum_{n=1}^N y_{t_i+n-1} e^{-j \frac{2\pi}{M} (n-1)(k-1)} \right|, \quad k = 1, \dots, \frac{M}{2}.$$

Для вычисления дискретного преобразования Фурье применяется алгоритм быстрого преобразования Фурье, имеющий максимальную производительность, когда длина последовательности входных данных является степенью 2 [7]. Поэтому число M является степенью 2 с наименьшим показателем: $M = 2^{\lceil \log_2 N \rceil}$.

Длина фрагмента N должна выбираться с учётом особенностей решаемой задачи. Большая длина позволяет точнее определить спектр сигнала, но может скрыть имевшие место быстрые изменения. Меньшая длина способствует выявлению изменений сигнала, но спектральные характеристики при этом вычисляются с большими погрешностями. Таким образом, длина фрагмента должна выбираться из компромисса между спектральным и временным разрешениями.

Период L обычно выбирается меньше длины фрагмента N . Тогда фрагменты речевого сигнала перекрываются. Это делается для того, чтобы не пропустить существенных изменений, если они происходят на границах фрагментов.

Построение кратковременного спектра сигнала в окне. Разделение речевого сигнала на фрагменты для построения кратковременных спектров эквивалентно умножению отсчетов на единичный коэффициент в окне и на нулевой вне его (прямоугольное окно). Это приводит к нежелательному

искажению спектра сигнала. Для уменьшения подобных искажений применяются окна с плавно спадающими до нуля коэффициентами по направлению к краям окна и сдвиг фрагментов сигнала с перекрытием. В данной работе используется окно Хэмминга. Значения отсчетов в окне Хэмминга определяются по формуле:

$$w_n = 0.54 - 0.46 \cos(2\pi \frac{n-1}{N+1}), 1 \leq n \leq N,$$

а отсчеты амплитудного спектра определяются по формуле:

$$A_i^k = \left| \sum_{n=1}^N y_{t_i+n-1} w_n e^{-j \frac{2\pi}{M} (n-1)(k-1)} \right|, k = 1, \dots, \frac{M}{2}.$$

Таким образом, идентифицированная модель речевого сигнала оказывается представленной последовательностью $A = \{A_1, A_2, A_3, \dots\}$, где i -й кратковременный спектр представлен своими отсчетами $A_i = \{A_i^k, 1 \leq k \leq M/2\}$.

Степень связи двух амплитудных спектров, $A_p = \{A_p^1, \dots, A_p^{M/2}\}$ и $A_q = \{A_q^1, \dots, A_q^{M/2}\}$ может выражаться коэффициентом корреляции, т.е. косинусом угла между двумя векторами отсчетов амплитудных спектров, принимая значения от 1 (полное совпадение спектров) до -1 (полная противоположность) [8]:

$$r(A_p, A_q) = \frac{\sum_{n=1}^{M/2} A_p^n A_q^n}{\sqrt{\sum_{n=1}^{M/2} (A_p^n)^2 \sum_{n=1}^{M/2} (A_q^n)^2}}.$$

Рассмотрим увеличение значений отсчетов амплитудных спектров на величину $a \geq 0$ и получим степень связи «усиленных» спектров:

$$r(\tilde{A}_p, \tilde{A}_q) = \frac{\sum_{n=1}^{M/2} (A_p^n + a)(A_q^n + a)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{M/2} (A_p^n + a)^2 \sum_{n=1}^{M/2} (A_q^n + a)^2}}.$$

Если считать, что величина a неограниченно растет, то разделив числитель и знаменатель на a , получим предельное значение степени связи:

$$\lim_{a \rightarrow \infty} r(\tilde{\mathbf{A}}_p, \tilde{\mathbf{A}}_q) = \lim_{a \rightarrow \infty} \frac{\sum_{n=1}^{M/2} \left(\frac{A_p^n}{a} + 1 \right) \left(\frac{A_q^n}{a} + 1 \right)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{M/2} \left(\frac{A_p^n}{a} + 1 \right)^2 \sum_{n=1}^{M/2} \left(\frac{A_q^n}{a} + 1 \right)^2}} = \frac{M/2}{\sqrt{(M/2)^2}} = 1$$

Легко увидеть, что при неограниченном росте величины a степень связи стремится к единице. Это означает, что в общем случае увеличение значений отсчетов амплитудных спектров на ограниченную константу приводит к увеличению степени связи спектров по сравнению с исходной.

Очевидно, что величину a не следует делать слишком большой, т.к. при этом устраняется различие в степени связи между похожими и непохожими спектрами.

В данной работе рассматриваются спектры зашумленного и незашумленного сигналов, исходная степень связи которых зависит от уровня шума. В каждом конкретном случае оказывается, что возрастание или убывание величины степень связи спектров двух сигналов, в итоге, зависит не только от значения a , но и от уровня шума. Ниже будет показано, что это отражается на результатах распознавания.

После «усиления» кратковременного амплитудного спектра на величину $a \geq 0$ получается новая последовательность амплитудных спектров $\tilde{\mathbf{A}} = \{\tilde{\mathbf{A}}_1, \tilde{\mathbf{A}}_2, \tilde{\mathbf{A}}_3, \dots\}$, где $\tilde{\mathbf{A}}_i = \{\tilde{A}_i^k, 1 \leq k \leq M/2\}$, $\tilde{A}_i^k = A_i^k + a$.

Адекватное восприятие. После этапов идентификации и генерации уменьшается влияние шума на спектры сигналов. Тестирующие зашумленные произношения команд могут классифицироваться по незашумленным эталонам речевых команд в обучающей выборке разными способами. В данной работе была построена система распознавания речевых команд на основе скрытых марковских моделей [9] для выполнения этапа адекватного восприятия.

Эксперименты. Были проведены эксперименты на 11 речевых командах из базы данных TIDigits 1.0 [10]. Были использованы 308 речевых сигналов (28 сигналов для каждой команды) в качестве обучающей выборки. На речевых сигналах обучающей выборки построена система распознавания речи с решающим правилом классификации 11 речевых команд. Были использованы 528 речевых сигналов (48 сигналов для каждой команды) для составления тестовой выборки. К этим речевым сигналам был искусственно добавлен аддитивный белый гауссовский шум с отношением сигнал/шум $R_{sn} = 3$ дБ.

Аддитивный белый гауссовский шум $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_T\}$ представляет собой вектор длины T , элементами которого являются случайные величины ξ_t , распределенные по нормальному закону с матожиданием 0 и

среднеквадратическим отклонением 1.

Для заданного речевого сигнала $Y = \{y_1, \dots, y_T\}$ и значения R_{sn} зашумленный речевой сигнал $\Psi = \{\psi_1, \dots, \psi_T\}$ образован по формуле [11]:

$$\psi_t = y_t + 10^{-\frac{R_{sn}}{20}} \xi_t \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^T y_i^2}{\sum_{i=1}^T \xi_i^2}}, \quad t = 1, \dots, T.$$

Описанные выше этапы обработки речевого сигнала без усиления значений кратковременных амплитудных спектров назовем *схемой без усиления*. Тогда обработку сигнала с усилением значений кратковременных амплитудных спектров назовем *схемой с усилением*. Распознанный класс каждого зашумленного речевого сигнала по каждой схеме сравнивался с его истинным классом. Для каждой схемы была определена частота правильного распознавания $v = \frac{Z - Z_{err}}{Z}$, где Z – общее число произнесенных речевых команд, Z_{err} – число ошибочно распознанных.

Такие эксперименты были проведены с разными отношениями сигнал/шум $R_{sn} = 3, 6, 9, \dots, 60$. Результаты экспериментов показаны на рис. 1. Результат распознавания для схемы с усилением (рис. 1) был получен при длине фрагментов речевого сигнала $N = 760$, где период обработки $L = N/4$, значение параметра увеличения амплитудного спектра $a = 2$.

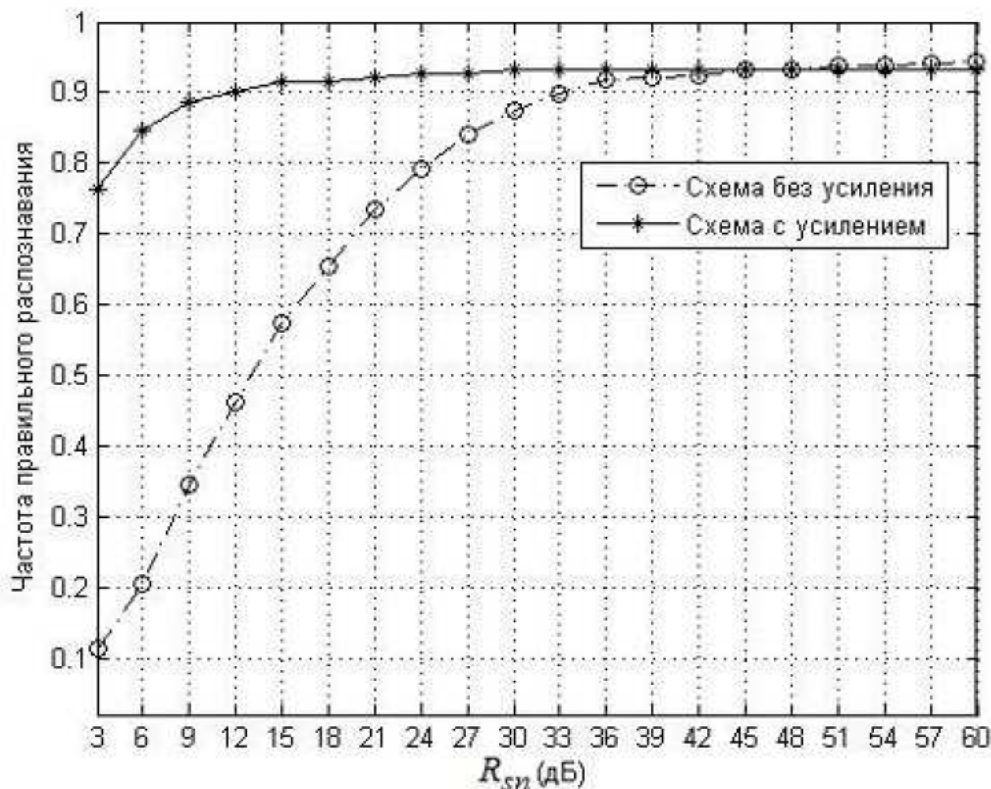


Рис. 1. Зависимость результата распознавания от отношения сигнал/шум

Рис. 1 показывает, что при «усилении» на константу амплитудных спектров сигналов увеличивается их степень связи, что улучшает качество распознавания. Но на это влияет шум. На рис. 1 показано, как влияет шум на качество распознавания при «усилении» спектров сигналов. Если тестирующие сигналы сильно зашумлены ($R_{Sn} < 45$), то при добавлении константы ($a = 2$) качество распознавания резко улучшается. Если тестирующие сигналы меньше зашумлены, то добавление константы все меньше и меньше влияет на качество распознавания, а при некотором уровне шума (в экспериментах $R_{Sn} \geq 45$) качество распознавания ухудшается, хотя и не существенно ($< 1\%$).

Также показано, что результат распознавания для схемы с усилением зависит от величины a . Было рассмотрено влияние значения a на результат распознавания при фиксированной длине фрагментов $N = 760$, периоде обработки $L = N/4$ и отношении сигнал/шум $R_{Sn} = 12$. На рис. 2 показаны результаты распознавания для схемы с усилением при значениях $a = 0, 0.1, \dots, 0.5, 1, \dots, 10$. Оказалось, что с увеличением значения a частота правильного распознавания сначала быстро растет, а потом даже немного падает. Слишком большую константу добавлять нельзя, потому что это ухудшает качество распознавания.

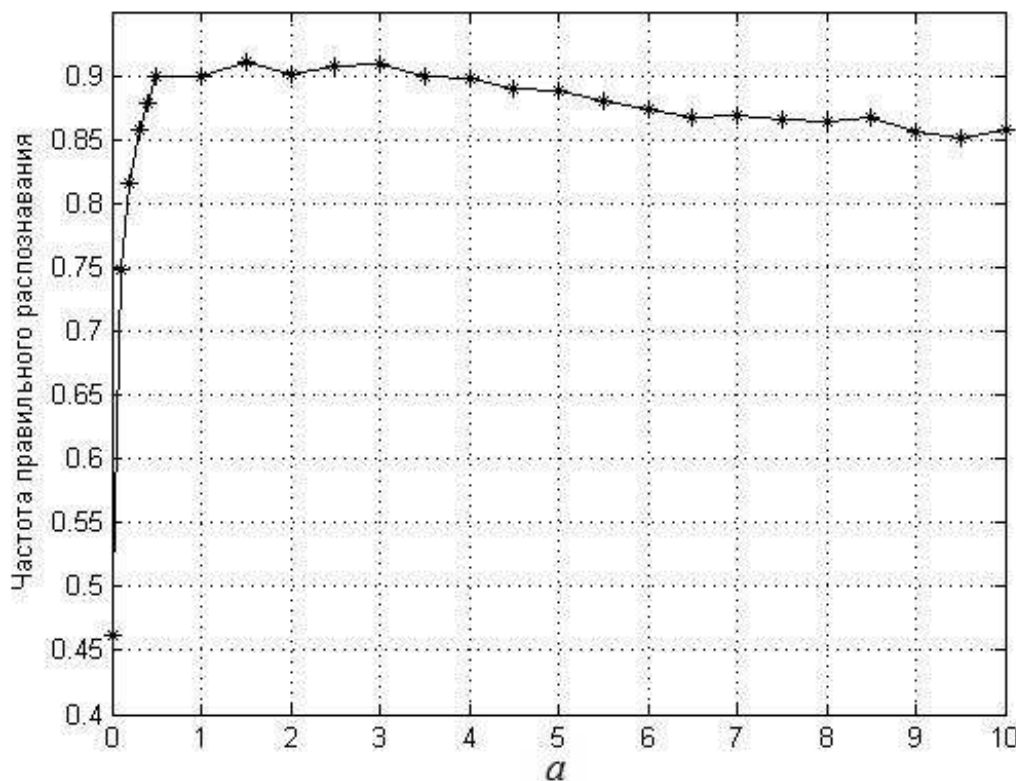


Рис. 2. Зависимость результата распознавания для схемы с усилением от значения a

Наконец, показано, что результат распознавания для схемы с усилением зависит не только от «усиления» амплитудного спектра на величину a , но и от выбора длины фрагментов речевого сигнала N . Было рассмотрено влияние длины фрагментов речевого сигнала N на результат распознавания при фиксированном периоде обработки $L = N/4$, значении $a = 2$, отношении сигнал/шум $R_{sn} = 12$. На рис. 3 показаны результаты распознавания для схемы с усилением при значениях длины $N = 40, 48, \dots, 80, 120, \dots, 800$. Оказалось, что при возрастании N качество распознавания резко возрастает при небольшой длине фрагмента сигнала, а потом колеблется около некоторого уровня. При значении $N = 640$ частота правильного распознавания оказалась максимальной среди тестируемых значений.

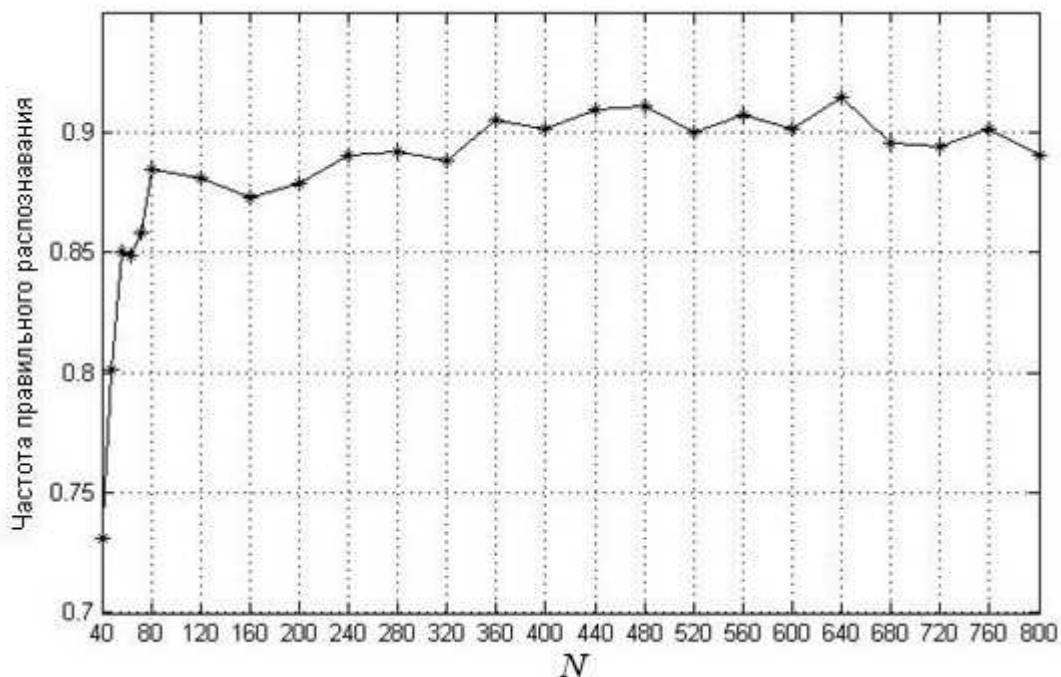


Рис. 3. Зависимость результата распознавания для схемы с усилением от значения N

В работе предложено решение задачи распознавания речевых команд на фоне шумов. Предложенный подход для аддитивного белого гауссовского шума значительно улучшает результат распознавания в случаях существенного шума и незначительно ($< 1\%$) ухудшает результат распознавания в случаях малого шума.

Предложенный подход к распознаванию речевых сигналов основан на параметрической модели, описанной в данной работе на шаге идентификации. Эксперименты показали, что результат распознавания сильно зависит от значений параметров такой модели. Следовательно, необходимо

решать задачу оптимизации параметров для улучшения качества распознавания.

Список литературы

1. Нгуен Ч.Т. Решение задачи распознавания речевых команд // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 6. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Ч. 2. С.176-184.
2. Kamath S. A multi-band spectral subtraction method for enhancing speech corrupted by colored noise./ S Kamath, P Loizou // International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP'02), Orlando, USA, 2002. Vol. 4. P. IV–4164.
3. Scalart P. Speech enhancement based on a priori signal to noise estimation./ P Scalart, JV Filho// International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP'96), Atlanta, USA, 1996. Vol. 2. P. 629–632.
4. Hung et al. Enhancing the magnitude spectrum of speech features for robust speech recognition // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2012, Issue 1. P. 1-20.
5. Benesty J. Handbook of speech processing. / J. Benesty [et al.] // Springer, 2008. 1159 p.
6. Klautau A. Mel-frequency cepstrum coefficients [Электронный ресурс] // URL: <http://www.cic.unb.br/~lamar/te073/Aulas/mfcc.pdf> (дата обращения: 10.10.2013).
7. Потемкин В.Г. Справочник по Matlab [Электронный ресурс] // URL: <http://www.exponenta.ru/soft/matlab/potemkin/book2> (дата обращения: 16.10.2013).
8. Давыдов А.В. Сигналы и линейные системы. Лекции. [Электронный ресурс] // URL: <http://gendocs.ru/v13566/> (дата обращения: 16.10.2013)
9. Аграновский А.В. Теоретические аспекты алгоритмов обработки и классификации речевых сигналов. М: «Радио с связь», 2004. 162 с.
10. Leonard G., Doddington G. TIDigits [Электронный ресурс] // Linguistic Data Consortium, Philadelphia, 1993. URL: isip.piconepress.com/projects/speech/software/tutorials/production/fundamentals/v1.0/section_02/s02_04_p01.html (дата обращения: 23.03.2013).
11. Wojcicki K. Add noise to a signal at a prescribed SNR level [Электронный ресурс] // URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/> (дата обращения: 10.10.2013).

Нгуен Чи Тхиен, асп., chithien55@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

**SOLVING THE PROBLEM OF RECOGNITION OF SPEECH COMMANDS
ON THE BACKGROUND NOISE**

C.T. Nguyen

The problem of recognition of speech commands on the background noise is studied. To improve the quality of speech recognition a heuristic technique is proposed, which is to increase the sample values of the amplitude spectra of speech signals by a constant. The results of experiments are reported.

Key words: amplitude spectrum, speech recognition, additive white Gaussian noise, identification, speech signal model.

Nguyen Chi Thien, postgraduate, chithien55@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 502.7:502.55

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

А.А. Горюнкова

Дано понятие «экологический мониторинг», основные цели, задачи и структурная схема экологического мониторинга, приведены основные процедуры. Для осуществления мониторинга загрязнения атмосферы разработаны различные автоматизированные информационные системы, многие из которых используются различными экологическими службами и предприятиями. Приведен обзор наиболее известных автоматизированных систем экологического мониторинга, выявлены их достоинства и недостатки.

Ключевые слова: экологический мониторинг, загрязнение атмосферы, автоматизированная система, принятие решений.

Понятие мониторинга окружающей среды впервые было введено профессором Р. Манном на Стокгольмской конференции ООН по окружающей среде в 1972 г. и в настоящее время получило международное распространение и признание.

Мониторингом окружающей среды было предложено называть систему повторных наблюдений одного и более элементов окружающей природной среды в пространстве и во времени с определенными целями в соответствии с заранее подготовленной программой. Однако вскоре стало ясно, что такое определение сужает рамки содержания мониторинга и не позволяет во всей полноте раскрыть его цели и задачи.

Блок-схема мониторинга представлена на рис. 1.

Основные цели экологического мониторинга в обеспечении системы управления природоохранной деятельности своевременной и достоверной информацией, позволяющей:

оценить показатели состояния и функциональной целостности экосистем;

выявить причины изменения этих показателей и оценить последствия таких изменений, а также определить корректирующие меры в тех случаях, когда целевые показатели экологических условий не достигаются;

создать предпосылки для определения мер по исправлению создающихся негативных ситуаций до того, как будет нанесен ущерб.

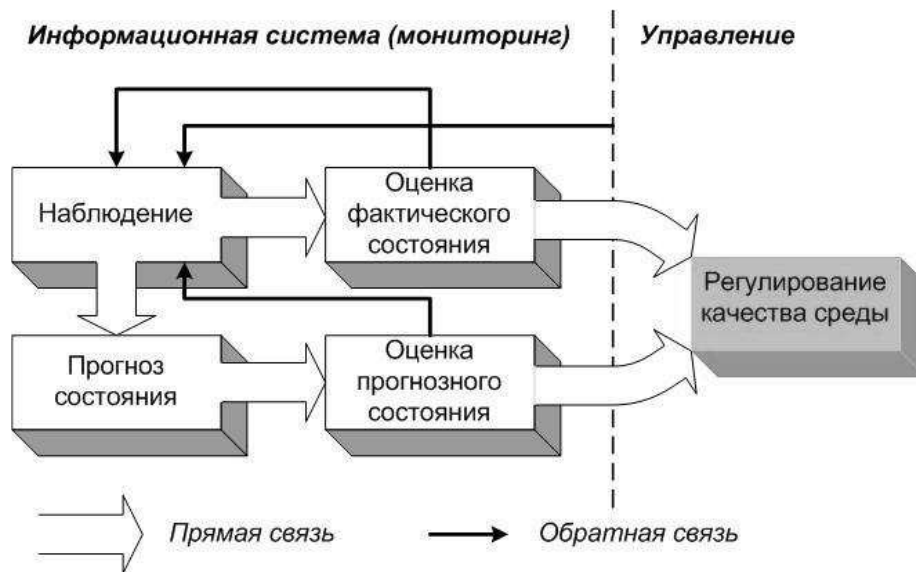


Рис.1. Блок-схема системы мониторинга

В этой связи основными задачами экологического мониторинга являются:

наблюдение за источниками и факторами антропогенного воздействия, за состоянием природной среды и происходящими в ней процессами под влиянием факторов антропогенного воздействия;

оценка фактического состояния природной среды, прогноз изменения состояния природной среды под влиянием факторов антропогенного воздействия и оценка прогнозируемого состояния природной среды.

В общем виде структурная схема мониторинга показана на рис. 2.

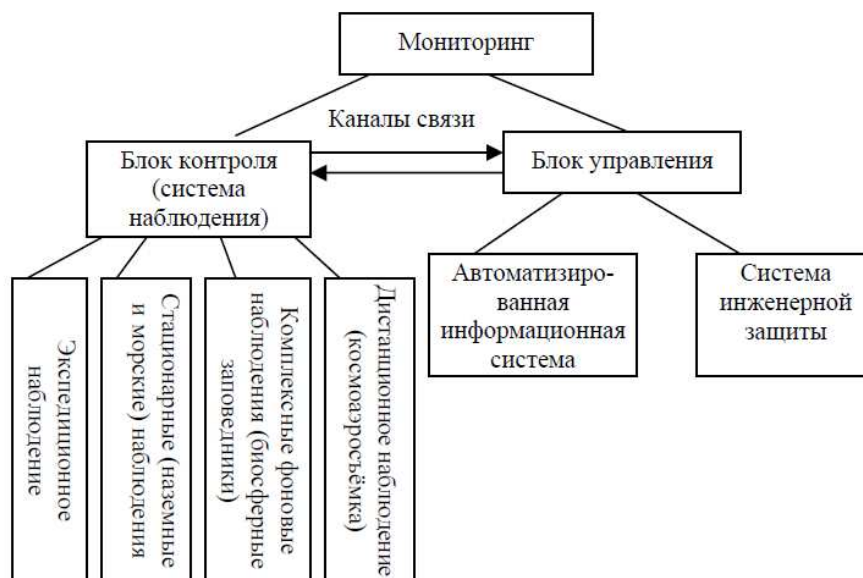


Рис. 2. Структурная схема мониторинга

Из этой схемы следует, что её основными частями являются блок контроля (система пунктов получения информации) и блок управления (прогнозно-диагностический и управляющий центры), связанные между собой каналами передачи информации. Важными элементами структуры мониторинга являются: системы объектов мониторинга (почвы, воды, воздух и др.); системы производственных работ, составляющих производственную базу мониторинга (виды работ, которые используются при организации и проведении мониторинга); системы научно-методических разработок (разработка всего комплекса методик, используемых при планировании, организации и функционировании мониторинга, при проведении производственных работ, при анализе и оценке результатов наблюдений, при прогнозировании и выдаче управляющих решений; системы технического обеспечения (аппаратура для наблюдений и сбора первичной информации, датчики, индикаторы, технические средства, автотранспорт, лабораторное оборудование, компьютеры и средства связи и коммуникаций и др.).

Научные исследования в области охраны окружающей среды сейчас сориентированы на снижение возможных отрицательных последствий того или иного вида хозяйственной деятельности, направлены на разработку эффективных методов очистки газовых выбросов и сточных вод, на обоснование норм допустимых воздействий на природные экосистемы. Среди таких исследований особое место занимают исследования по созданию и применению систем мониторинга воздушной среды.

Для установления степени загрязнения атмосферного воздуха всеми примесями, выбрасываемыми существующими и намечаемыми к строительству и пуску источниками, а также характер изменения полей концентрации примесей по территории и во времени разрабатываются электронные карты загрязнения воздуха, построенные по результатам, полученных со стационарных постов наблюдений за состоянием атмосферы и систем экологического мониторинга.

Основные процедуры системы мониторинга загрязнения атмосферы:

- выделение объекта наблюдения;
- обследование выделенного объекта наблюдения;
- составление информационной модели для объекта наблюдения;
- планирования измерений;
- оценка состояния объекта наблюдения и идентификация его информационной модели;
- прогнозирование изменения состояния объекта наблюдения;
- представление информации в удобной для использования форме и доведение ее до потребителя.

Экологическая информация поступает в центральный диспетчерский пункт, который осуществляет: сбор, анализ и хранение информации о трансграничном переносе примесей в атмосфере; прогнозирование переноса

са примесей на основе метеорологических данных; идентификацию районов выбросов и источников; регистрацию и расчет выпадений примесей из атмосферного воздуха на подстилающую поверхность и другие работы.

Для осуществления мониторинга загрязнения окружающей среды разработаны различные автоматизированные информационные системы. Многие из них используются различными экологическими службами и предприятиями.

В работе [1] описывается автоматизированная распределенная система экологического мониторинга окружающей среды модульного типа (АРСЭМ), которая позволяет повысить точность, объективность получаемых данных, исключить ошибки в расчетах и возможность несанкционированного доступа. Целью создания распределенной системы модульного типа является обеспечение надежного контроля за состоянием специального объекта, а также мониторинг состояния окружающей среды в районе его расположения, что позволит заблаговременно предупредить о возможном возникновении аварийных ситуаций, которым, как правило, предшествуют небольшие выбросы, утечки или испарения опасных веществ или продуктов их распада. В случае возникновения нештатных ситуаций информация о реальной обстановке позволит организовать действенные меры по устранению последствий и снизить их воздействие на население и окружающую среду. Такая система контроля может охватывать значительную территорию вокруг контролируемого объекта, но вся информация собирается в едином контрольном центре независимо от места нахождения объекта.

В работе [2] рассмотрена автоматизированная система экологического мониторинга, которая представляет собой совокупность объектов, расположенных на территории производственной площадки, санитарно-защитной зоны и зоны влияния предприятия, которые выполняют функции измерения, передачи и обработки технологических и экологических параметров и функционируют в единой информационно-вычислительной системе. Система обеспечивает автоматизированный сбор, обработку, хранение, передачу и анализ экологической информации, экологическое моделирование и прогнозирование и распределенную обработку данных.

В задачи автоматизированной системы экологического мониторинга входит оперативная оценка экологической обстановки на контролируемой территории на основе данных измерений, актуальных данных о параметрах стационарных и залповых выбросов загрязняющих веществ и результатов математического моделирования процессов переноса загрязнений в окружающей среде [3].

К недостаткам этих двух систем можно отнести локальные ограничения, т.е. система охватывает один или небольшую группу объектов, отсутствие возможности предоставления информации через глобальную сеть, а также отсутствие возможности выдачи рекомендаций при принятии управленческих решений, например, по снижению выбросов вредных ве-

ществ в атмосферу.

Существует автоматизированная система наблюдений и контроля окружающей среды (АНКОС-АГ), которая предназначена для автоматизированного сбора, обработки и передачи информации об уровне загрязнения атмосферного воздуха. Система позволяет непрерывно получать информацию о концентрации примесей и метеорологических параметрах в населенных пунктах или около крупных промышленных предприятий. Технические возможности регистрации, передачи, хранения и обработки данных о загрязнении атмосферного воздуха позволили разработать основные принципы функционирования автоматизированных систем наблюдения за состоянием атмосферного воздуха [4].

Ведутся разработки и в области мобильных и малогабаритных автоматизированных систем экологического мониторинга.

Система контроля атмосферы СКАТ-1 предназначена для непрерывного автоматического контроля двуокси углерода CO_2 и влажности в атмосфере производственных помещений, а также контроль ПДК рабочей зоны по CO_2 . Система СКАТ-1 позволяет обеспечить автоматическую регулировку технологического процесса подачи углекислого газа с помощью переключающихся контактов реле порогов срабатывания «мало» и «много» (включение и отключение газогенераторов, регулирование заслонок подачи топочных газов котельной) и т.д. С помощью пульта контроля можно проводить калибровку датчиков без демонтажа. В состав системы входит от одного до четырех датчиков CO_2 и влаги [5].

Автоматический пост экологического контроля (АПЭК) атмосферного воздуха предназначен для проведения непрерывного автоматического измерения массовой концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и контроля метеорологических параметров. Учитывая его габариты, массу и функциональные возможности, АПЭК может использоваться как передвижное средство для проведения регулярных маршрутных экологических исследований атмосферного воздуха, а также для проведения оперативных измерений загрязнения окружающей среды при аварийных и нештатных ситуациях на полигонах, промышленных площадках, в населенных пунктах [6].

Передвижная лаборатория «АТМОСФЕРА-2» предназначена для осуществления контроля за загрязнением воздуха, измерения метеорологических параметров: атмосферного давления, скорости и направления ветра, температуры и относительной влажности воздуха, а так же экспрессной оценки загрязнения вод и почвы. Лаборатория передвижная «АТМОСФЕРА-2» используется в системе гидрометслужб, организациями, осуществляющими контроль за загрязнением атмосферы, воды, почвы. А так же службами МЧС, Мин. обороны. СЭН, Мин. природы. Мин. экологии России, службами геологоразведки и охраны окружающей среды.

Мобильные лаборатории для мониторинга атмосферы городов,

сельской местности, промышленных зон монтируются на базе легковых и грузовых автомобилей, прицепов с воздушным кондиционированием всех рабочих отсеков автомобиля. Внутри автомобиля (прицепа) крепятся стойки с необходимыми селективными анализаторами (SO_2 , $\text{NO-NO}_2\text{--NO}_x$, CO , CO_2 , O_2 , O_3 , углеводородов, летучей органики, H_2S , меркаптанов, NH_3 , пыли) и компьютеризированной системой сбора и обработки информации [6].

Еще одной известной системой является автоматизированная система контроля пылегазоочистных установок «АСК ПГУ». Система применяется на предприятиях цветной и черной металлургии, а также любых производствах с вредными выбросами газов и пыли в атмосферу.

К достоинствам системы относятся: комплексный автоматический контроль и управление параметрами пылегазоочистных установок; использование для контроля основных параметров пылегазоочистных установок высоконадежных и имеющих европейскую сертификацию импортных приборов ведущих зарубежных фирм мира, таких как «Байер Диагностика», «ЗИК» и других; оптимальное сочетание импортного и отечественного оборудования, позволяющее значительно снизить валютные затраты; применение энергонезависимых запоминающих устройств, позволяющих сохранять информацию в течение 72-х часов при отключении питающей сети.

Система контроля атмосферы промышленных объектов (СКАПО). Многоканальная газоаналитическая система СКАПО (рис. 3), предназначенная для непрерывного автоматического контроля концентраций токсичных, взрывоопасных газов и кислорода сигнализации о превышении заданных порогов, а также управления исполнительными устройствами (системы вентиляции, звуковые и световые сигнализации). Универсальность и гибкость в конфигурации системы позволяет эффективно и экономично решать вопросы комплексного контроля в рабочей зоне ПДК токсичных (CO_2 , CO , SO_2 , Cl_2 , NH_3 , H_2S), ДВК взрывоопасных (CH_4 , C_3H_8) газов и кислорода (O_2). Структура системы позволяет контролировать степень загазованности как непосредственно на объектах, так и в операторной и на персональной ЭВМ.

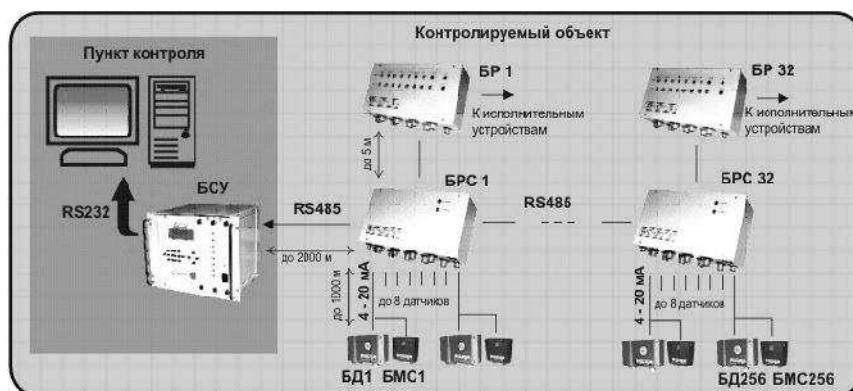


Рис. 3. Структура системы СКАПО

Достоинства системы: структура системы позволяет заменить практически весь парк существующих на производстве стационарных газоаналитических приборов и контролировать на производстве до 256 потенциально опасных точек; контролируемый объект может быть расположен на расстоянии до 3000 метров от блока сигнализации и управления. При создании системы контроля максимальное удаление объекта до 65 километров; широкий спектр контролируемых газов обеспечивается возможностью комплектования системы датчиками с различными принципами действия, в том числе оптико-абсорбционными и термомагнитным; все датчики собственного изготовления и имеют единый конструктив, что позволяет значительно упростить монтаж и эксплуатацию системы; возможность архивирования информации о состоянии объектов и имевших место аварийных ситуациях позволяет контролировать и протоколировать состояние загазованности; наличие энергонезависимой памяти дает возможность сохранять информацию при отключении сетевого питания.

К недостаткам системы можно отнести то, что система предоставляет информацию о точечных замерах, зоны влияния не строятся, система применяется на определенном предприятии, и ее нельзя использовать на региональном уровне.

Система «EcoMonitor» предназначена для автоматизации непрерывного мониторинга выхлопных газов, производимых нагревательными котлами и промышленными топками в деревообрабатывающей и бумажной промышленности разработана удобная, легко конфигурируемая клиент-серверная система, на базе встраиваемых плат сбора данных, модулей согласования сигналов, работающая под управлением LabVIEW [7]. Задача системы заключается в сборе, передаче, обработке, архивации и отображении требуемых параметров.

Автоматизированная система контроля за экологическим состоянием воздушного бассейна «ИнтерАналит» представляет собой полностью автоматизированную, автономную систему для контроля концентраций основных загрязнителей (CO , $\text{NO-NO}_2\text{-NO}_x$, SO_2 , H_2S , углеводороды, запыленность и др.) в воздухе жилой и промышленной зон на базе стационарных постов, укомплектованных газовыми анализаторами. Посты снабжены системами связи с центральной диспетчерской для сбора данных и управления работой приборов, автономным питанием, сигнализацией о несанкционированном доступе. Система обеспечена полной технической поддержкой, гарантией и обучением [8]. К недостаткам автоматизированной системы контроля за экологическим состоянием воздушного бассейна «ИнтерАналит» можно отнести отсутствие возможности предоставления информации через глобальную сеть, а также отсутствие возможности выдачи рекомендаций по снижению выбросов вредных веществ в атмосферу.

В настоящий момент существует несколько десятков автоматизиро-

ванных систем моделирования распространения вредных веществ в атмосфере, а также систем мониторинга атмосферного воздуха. Многие из существующих систем используются различными экологическими службами и предприятиями.

Одной из самых распространенных систем является система «Эколог-город» 3.0. Согласно [9] система «Эколог-город» разработана для автоматизации деятельности комитетов охраны окружающей среды Госкомэкологии РФ и экологических служб администраций городов (регионов), проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов. Результаты сводных расчетов загрязнения атмосферы могут быть использованы в целях нормирования выбросов загрязняющих веществ и для решения других задач. Система состоит из программы автоматического приема информации о параметрах источников выброса предприятий по подготовленным в едином формате данным; программы ведения обобщенного городского банка данных по источникам выбросов; программы «Магистраль», позволяющая производить расчет выбросов загрязняющих веществ автотранспортными потоками при движении автомобилей по городским магистралям; программы расчета концентраций вредных веществ в атмосфере; программы отображения результатов на электронной карте города – «Экологическая карта».

К недостаткам системы относятся: в существующей реализации нет возможности определения допустимых вкладов в загрязнение атмосферы выбросов загрязняющих веществ предприятиями; не предусмотрен модуль, с помощью которого производится сбор экологической информации. Все данные для статистической обработки поступают в систему с помощью сторонних средств или стационарных постов, что ведет к задержке поступления данных.

В качестве альтернативы системы «Эколог-город» многие организации используют систему «АТМОСФЕРА-ПДВ». Комплекс позволяет провести инвентаризацию выбросов на предприятиях; произвести расчеты приземных концентраций загрязняющих веществ в соответствии с [10]; произвести расчет ПДВ (ВСВ) в соответствии с методикой; рассчитать валовые выбросы (г/сек и т/год) от источников выделения по реализованным фирмой или самим пользователем методикам расчетов. Программа расчета приземных концентраций вредных веществ в атмосфере позволяет проводить расчеты разовых концентраций загрязняющих веществ, выбрасываемых точечными, линейными, плоскостными источниками. Рассчитываются приземные концентрации, как отдельных веществ, так и групп веществ, обладающих эффектом суммации вредного воздействия. Недостатки данной системы аналогичны недостаткам системы «Эколог-город».

Проанализировав указанные и другие системы, были сделаны выводы о том, что основными функциями этих систем являются: выполнение

круглосуточных автоматических измерений метеорологических параметров атмосферы и концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе; передач результатов измерений в Центр мониторинга (сервер); оценка экологической ситуации в контролируемых районах в режиме реального времени; прогнозирование динамики загрязнений в зависимости от метеорологических параметров атмосферы; создание архивов экологических данных; выявление источников выбросов в атмосферу.

Общими недостатками этих систем является то, что в них [11]:

отсутствует обеспечение информационно-справочными материалами,

отсутствуют возможность предоставления информации через глобальную сеть, создания поисковых запросов, т.е. удовлетворение пользовательских запросов на получение конкретных данных и формы их представления;

система предоставляет информацию о точечных замерах, зоны влияния различных источников загрязнения не строятся;

отсутствует возможность выдачи рекомендаций при принятии управленческих решений, например, по снижению выбросов вредных веществ в атмосферу.

В связи с этим предлагается усовершенствовать информационно-измерительную и управляющую систему экологического мониторинга, задачами которой станут: хранение и поиск режимной информации о состоянии окружающей среды; целенаправленная постоянная обработка и оценка информации; выполнение перманентных прогнозов развития и состояния окружающей среды; решение оптимизационных задач по принятию управленческих решений.

Материалы подготовлены в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук и докторов наук (Конкурс 2013-2014 годов).

Список литературы

1. Бурман В.М., Кропотов Ю.А. Автоматизированная распределенная система экологического мониторинга окружающей среды модульного типа// Известия ОрелГТУ. Серия «Информационные системы и технологии». 2008. № 1-2/269(544). С. 53-57.

2. Кропотов Ю.А., Суворова Г.П. Марковские модели в автоматизированной системе мониторинга и прогнозирования экологического состояния промышленной зоны// Известия ОрелГТУ. Серия «Информационные системы и технологии». 2008. № 1-3/269(544). С. 113-118.

3. Суворова Г.П. Автоматизированная система экологического контроля предприятия [Текст] / Г.П. Суворова // Методы и устройства передачи и обработки информации : межвуз. сб. научн.тр. Вып. 4 / под ред.

В.В. Ромашова, В.В. Булкина. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. С. 347.

4. Егоров А.Ф. Методы идентификации мгновенных аварийных источников загрязнения атмосферного воздуха / Егоров А.Ф., Савицкая Т.В., Дударов С.П. // Химическая технология, 2002, №10. С. 41-46.

5. Системы контроля атмосферы СКАТ-1// <http://www.analitsv.ru/katalog/dw8yv42m.html> (дата обращения: 23.08.2013).

6. Бизикин А.В. Безопасность и риск при техногенных воздействиях: монография. / В.М. Панарин [и др.], Тула: Из-во ТулГУ, 2006. 164 с.

7. Донченко В.К. Экометрия: системно-аналитический метод эколого-экономической оценки и прогнозирования потенциальной опасности техногенных воздействий на природную среду / Донченко В.К. // Инженерная экология. 1996. № 3. С.45-61.

8. Автоматизированная система контроля за экологическим состоянием воздушного бассейна «ИнтерАналит»// <http://www.analyt.ru/catalog/element.php?ID=903> (дата обращения: 15.08.2013).

9. Бизикин А.В. Принципы построения автоматизированной системы экологического мониторинга при выбросах вредных веществ/ А.В. Бизикин [и др.] // Экологически устойчивое развитие центрального федерального округа: докл. науч.-практ. Форума / под общ. ред. д.т.н., проф. В.М. Панарина, Тула:Изд-во ТулГУ, 2008. С. 173-182.

10. Комплекс программ для автоматизации атмосфероохранной деятельности "АТМОСФЕРА-ПДВ"// http://logosoft.ru/prog/eco_atm_about.htm (дата обращения: 15.08.2013).

11. Автоматизированная система сбора и анализа экологической информации о загрязнении атмосферного воздуха/ А.А. Горюнкова [и др.]// Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 1. С. 9-11.

Горюнкова Анна Александровна, канд. техн. наук, доц., anna_zuykova@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

CURRENT STATUS AND APPROACHES TO DEVELOPMENT ATMOSPHERIC POLLUTION MONITORING

A.A. Goryunkova

Given the concept of "environmental monitoring", main goals, objectives and structural diagram of environmental monitoring are the main treatments. For the implementation of air pollution monitoring developed various thanes of automated information systems, many of which are used by various environmental agencies and enterprises. An overview of the most famous of automated systems for environmental monitoring, identified their strengths and weaknesses.

Key words: environmental monitoring, atmospheric pollution, the automated system, decision-making.

Goryunkova Anna Alexandrovna, candidate of technical science, docent, anna_zuykova@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЛЛЮТАНТОВ ЗА ПРЕДЕЛЫ САНИТАРНО-ЗАЩИТНОЙ ЗОНЫ ХВОСТОХРАНИЛИЩ ПРЕДПРИЯТИЙ

А.Н. Огородник

Спрогнозировано распространения загрязнителей за пределы санитарно-защитной зоны хвостохранилищ предприятий. Использованы модель Гаусса и модель градиентного переноса при расчете рассеяния примесей в условиях развитого турбулентного обмена. Осуществлен прогноз объемной концентрации поллютантов в приземном слое атмосферного воздуха за счет дефляционных процессов. Предложена технология пылеподавления хвостохранилищ предприятий.

Ключевые слова: прогнозирование, хвостохранилища, дефляция, поллютант, экологическая безопасность.

Общее антропогенное давление на окружающую среду в последние годы имеет тенденцию к уменьшению, уровень техногенного воздействия на него остается высоким, а экологическая ситуация близка к кризисной. Более четверти сбросов сточных вод в поверхностные и подземные водные объекты Украины остаются загрязненными, пятая часть вредных веществ, выбрасываемых из стационарных источников, поступает в виде газов и аэрозолей непосредственно в атмосферу, почти две трети образующихся

твердых и жидких отходов попадают в окружающую среду. [3, 5, 6].

На сегодняшнее время не предложено единой физико-математической модели, которая способна объяснить и учесть многочисленные аспекты проблемы атмосферной диффузии. Существуют два основных подхода к решению задач о рассеянии веществ в подвижных жидких или газообразных средах в зависимости от тех или иных факторов, характеризующих среду и источник, - это теория градиентного переноса (или полуэмпирическая теория диффузии) и статистическая теория диффузии (методика Пасквилла-Брайанта [11]). Полуэмпирическая теория основана на свойствах движения примеси относительно системы координат, фиксированная в пространстве, и предполагает пропорциональность потока примеси градиенту ее концентрации в воздухе. Статистическая (гауссова) теория рассматривает диффузию, как турбулентность в переменных Лагранжа. Между этими подходами существует близкая связь, они описывают одно и то же явление, но области их применения не всегда одинаковы. Существует ряд задач атмосферной диффузии, где рассмотрение возможно лишь на основании одной из этих теорий. Так, гауссова модель предназначена для определения рассеивания примесей в атмосфере при мгновенных, кратковременных (от 20 минут до нескольких часов) и непрерывно действующих их выбросах. Модель градиентного переноса используется при

расчете рассеяния примесей в условиях развитого турбулентного обмена и определения только разовых двадцатиминутных концентраций. Это нужно учитывать при постановке и решении задач по оценке процессов рассеивания выбросов в атмосферном воздухе.

Однако общий вид прогнозируемой объемной концентрации веществ в воздухе на определенном расстоянии x от источника выброса примесей можно представить в общем виде для обеих моделей формулой:

$$C_x = G_x(v, t, \eta) \cdot q, \quad (1)$$

где C_x – объемная концентрация загрязняющего вещества в приземном слое атмосферного воздуха на расстоянии x от источника выброса, (г/м³); $G_x(\eta, v, t)$ – фактор метеорологического разбавления на расстоянии x от источника выброса, (с/м³), зависит от параметров (линейность, объемность и др.) и вида (высокое, низкое, наземное и др.) источника выброса – переменная η , от скорости ветра v , продолжительности диффузии t от источника выброса; q – интенсивность выброса загрязняющих веществ в атмосферный воздух от источника выброса, (г/с).

Фактор метеорологического разбавления $G_x(\eta, v, t)$ определяется исходя из поставленной задачи с гауссовой или градиентной модели переноса примесей в воздухе. В случае вынесения в атмосферу поллютантов хвостохранилищ предположено, что хвостохранилище представляет собой объемный наземный источник выброса. Учтено, что для таких источников максимум приземной концентрации находится непосредственно в районе расположения источника, и значение максимума является тем больше, чем слабее является вертикальное и горизонтальное рассеивание, т. е. чем больше устойчивость приземного слоя атмосферы и уменьшилась скорость ветра v .

Расчет концентраций от наземных источников выполняется на основе аналитических или численных решений уравнений турбулентной диффузии. Однако учитывая особенность и невозможность этих решений при неблагоприятных метеорологических условиях (при приземной инверсии температуры и ослаблении скорости ветра до нуля), когда концентрация примесей в воздухе будет бесконечно расти на всех расстояниях от источника выброса, то определение фактора метеорологического разбавления $G_x(v, t, \eta)$ выполнено по формуле, предложенной М. Берлянтом [1] при продолжительности диффузии t ($t \leq \min(T_1, T_2)$), где T_1 – время действия вынесения поллютантов с поверхности хвостохранилищ за счет дефляции Q ; T_2 – время сохранения метеорологических условий и учитывая методику расчета выбросов от неорганизованных источников [7]. Учитывая тот факт, что к неорганизованным выбросам относят выбросы в размере не направленных потоков, возникающих, в том числе из-за недостаточной работы средств пылеподавления в местах хранения поллютантов, то есть на складах, хвостохранилищ предприятий [6]:

$$G_x = \frac{A \cdot t \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_5}{10^4 \cdot x^3}, \quad (2)$$

где A – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы и определяющий условия горизонтального рассеивания атмосферных примесей ($c^{2/3.0} C$) (принято, $A=0,16$ за [2] для Украины); t – продолжительность дефляции (принято $t=6$ час. = 21600 сек), (с); k_1 – коэффициент, учитывающий местные метеорологические условия; k_2 – коэффициент, учитывающий местные условия, уровень защищенности хвостохранилищ от внешних воздействий, условия пылеподавления (принято $k_2=1,0$ – для условий 4-х боковой пространственной открытости хвостохранилища); k_3 – коэффициент, учитывающий влажность материала шлама (принято $k_3=1,0$ – для условий сухого шлама, т. е. влажность шлама не превышает 1 %); k_4 – коэффициент, учитывающий профиль поверхности хвостохранилищ и определяется как отношение $\frac{F_{факт}}{F}$ (величина k_3 находится в пределах 1,3 - 1,6 зависит от гранулометрического состава материала и уровня заполнения хвостохранилищ); k_5 – коэффициент, учитывающий гранулометрический состав материала (принято $k_5=1,0$); $F_{факт}$ – фактическая поверхность хвостохранилищ с учетом рельефа его сечения (учитывается площадь, которая пылит), ($м^2$); F – поверхность пыления в плане, ($м^2$).

Расчет фактора метеорологического разбавления G_x за формулой (2) осуществлено для расстояния $x=5$ км (ближайший населенный пункт от хвостохранилища красных шламов Николаевского глиноземного завода в направлении преобладающего направления ветра по розе ветров – Север) для объемной концентрации пыли в приземном слое атмосферы.

В результате задача, возникающая при вычислении прогнозной объемной концентрации C_x поллютантов хвостохранилища в приземном слое атмосферного воздуха на расстоянии x от хвостохранилища сведена к определению интенсивности q выноса загрязняющих веществ в атмосферный воздух с поверхности хвостохранилища, которая является функцией дефляции Q и фактической площади пыления с хвостохранилищ:

$$q = f(Q, F_{факт}), \quad (3)$$

где q – интенсивность выброса загрязняющих веществ в атмосферный воздух от источника выброса, (г/с); Q – интенсивность дефляции, (кг/(м·с)); $F_{факт}$ – фактическая поверхность хвостохранилищ с учетом рельефа его сечения (учитывается площадь, которая пылит), (га).

В расчетах принято, что фактическая площадь пыления (142 га) не

превышает 10 % от общей площади хвостохранилища $F_{факт} = 14,2$ га.

Уровень дефляции Q рассчитан для различных фракций шлама и относительным содержанием количества определенной фракции в шламе определен как интегральный показатель интенсивности дефляции красного шлама $Q_{к.ш.}$ (по разным фракциям):

$$Q_{ч.ш.} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 k_i \cdot Q_i,$$

где $Q_{ч.ш.}$ - интенсивность дефляции красного шлама (по разным фракциям), (кг/(м²·с)); k_i - относительный показатель количества фракций i в шламе ($i=1 \div 3$): $k_1 = 0.84$, $k_2 = 0.14$, $k_3 = 0.02$; Q_i - интенсивность дефляции фракции i шлама, (кг/(м·с)).

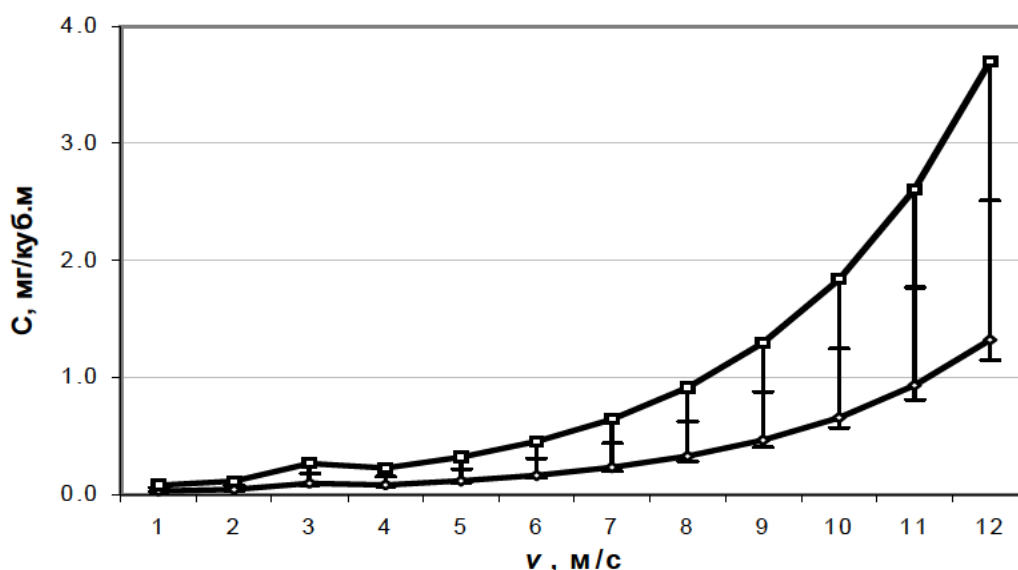
Рассчитав уровень дефляции, и учитывая зависимость ее интенсивности для легкого суглинка хвостохранилища от ширины поля [6] подставляем в (1) выражение (3), с учетом установленной величины полной плоскостности дефляции Q для шлама в целом, г/(м² · с) [9, 10, 11]:

$$Q_{ч.ш.}(v, Q_i) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 k_i \cdot Q_i(v)$$

и выражение (2) получим выражение для определения и прогнозирования объемной концентрации поллютантов хвостохранилища красных шламов в приземном слое атмосферного воздуха на расстоянии x от хвостохранилища:

$$C_x = 0,52 \cdot \frac{A \cdot t \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_5}{x^3} \cdot e^{0,7 \cdot v} \cdot F_{факт}.$$

Результаты прогнозирования отражено на рисунке.



Прогнозирование поля объемной концентрации пыли C , мг/м³ в приземном слое атмосферного воздуха

Как видно из рисунка, прогнозирования объемной концентрации пыли в приземном слое атмосферного воздуха показало, что объемная концентрация пыли составила 0,08 - 3,7 мг/м³, а уровень ПДК пыли в воздухе населенных пунктов может достигаться уже при скорости ветра 6 м/с.

Таким образом, за достаточно консервативным оценкам (при пылевой поверхности всего 10 % от всей площади поверхности хвостохранилища и расположения населенного пункта в 5 км от хвостохранилища) прослеживается формирование опасной ситуации со стороны загрязнения пылью и поллютантами хвостохранилища приземного слоя атмосферного воздуха в районе близлежащих населенных пунктов. Это является источником попадания к людям повышенной концентрации поллютантов из хвостохранилища как ингаляционным, так и через пищевую цепь вследствие оседания пыли на поверхности сельскохозяйственных угодий и дальнейшего перемещения по трофической цепи.

Это обосновывает проведение работ по разработке эффективного комплексного метода пылеподавления поллютантов на поверхности хвостохранилищ добывающих и перерабатывающих предприятий. При разработке технологии использования комплексного метода пылеподавления поверхности хвостохранилищ можно рекомендовать средства с дернины и камышовых матов. По результатам исследований данные материалы имеют высокую способность к снижению уровня дефляции на хвостохранилищах при различных метеорологических условиях (длительное, многократное колебания температуры воздуха, порывы ветра до 15 м/с, замерзания пульпы хвостохранилища, затопление хвостохранилища во время дождей и таяния снега); продолжительность по пылеподавления (до 50 лет), текущий ремонт системы сохраняет не менее 95 % ее функций; возможность раскрытия отдельных участков хвостохранилищ для реализации шламов и, в дальнейшем, с восстановлением покрытия; устойчивость к метеорологическим условиям и токсичной среды хвостохранилищ, отсутствие дополнительного негативной нагрузки на технобиогеоценоз хвостохранилищ и биогеоценоз территорий вокруг хвостохранилищ.

Список литературы

1. Берлянд М.Е., Генихович Е.Н. К нормированию выбросов от наземных источников // Труды ГГО. Вып. 387. Л., 1997. 78 с.
2. Григорьева Л.И., Томилин Ю.А. Нормирование антропогенной нагрузки на окружающую среду: учеб. пособие для вузов. Николаев: Изд-во НГГУ, 2005. 174 с.
3. Гошовський С.В., Рудько Г.І. Екологічна безпека техногенно-природних геосистем у зв'язку з катастрофічним розвитком геологічних процесів. К.: Вид-во: ЗАТ "НІЧЛАВА", 2002. 624 с.

4. Лисиченко Г.В., Забулонов Ю.Л. Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління. К.: «Наукова думка», 2008. 544 с.
5. Ляшенко В.И., Карпенко Б.В. Природоохранные технологии управления состоянием хвостохранилищ // Науковий вісник НГУ. №11. 2009. С. 69–76.
6. Мазур В.А., Горщар В.І. Екологічні проблеми землеробства. К.: Вид-во: Центр наукової літератури, 2010. 456 с.
7. Методическое пособие по расчету неорганизованных источников в промышленности строительных материалов / ЗАО «НИПИОТСТРОМ». Новоросийск, 2000. 32 с.
8. Монаков А.С. Разработка метода прогнозирования пылевых выбросов горно-обогатительными комбинатами в окружающую среду. // Автореф. диссер. кандидата техн. наук. М.: Московский государственный горный университет, 2004. 22 с.
9. Огородник А.М. Дослідження інтенсивності дефляції та ефективності методів пилопригнічення масивів-шламосховищ // Екологія і природокористування: збірник наукових праць. Вип. 15. 2012. С. 38–44.
10. Розробка та впровадження системи мінімізації впливів на довкілля небезпечних виробництв та підприємств ядерного циклу України // Заключний звіт по НТП / Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України. № II-2-10. К., 2010. 65 с.
11. Pasquill F. Atmospheric diffusion. Van. Nostr. – Co. LTD L, 1982.

Огородник Анна Николаевна, канд. техн. наук, старший преподаватель, kassmail@ukr.net, Украина, Николаев, Черноморский государственный университет имени Петра Могила

*PREDICTION OF THE POLLUTANTS BEYOND SANITARY PROTECTION
ZONE TAILING THE COMPANIES*

A.N. Ogorodnyk

Conducted forecast the spread of pollutants from its sanitary protection zone of tailings enterprises. Gauss used the model and the model of gradient transfer. The forecast of the volume concentration of harmful substances in the surface layer of air through wind erosion. A technology for dust suppression tailings enterprises.

Key words: prediction, tailings, deflation, pollutant, environmental safety.

Ogorodnyk Anna Nikolaevna, candidate of technical science, kassmail@ukr.net, Ukraine, Nikolayev, Petro Mohyla Black Sea State University

ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

А.А. Горюнкова

Рассмотрены этапы процесса формирования поражающих факторов, наносящих ущерб человеческим и материальным ресурсам, приведены параметры, характеризующие тот или иной этап, которые учитываются в моделях, положенных в основу информационно-измерительной и управляющей системы экологического мониторинга, рассмотрены условия и процедура принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, принятие решений, сеть Петри, системный анализ, экологический мониторинг.

Согласно статистике современных аварий, катастроф и несчастных случаев с людьми наибольший техногенный ущерб людским, материальным и природным ресурсам наносится пожарами, транспортными происшествиями, взрывами и разрушениями зданий. Большинство же техногенных происшествий обусловлено неконтролируемым высвобождением кинетической энергии движущихся машин и механизмов, а также потенциальной или химической энергией, накопленной в сосудах высокого давления и топливовоздушных смесях, конденсированных вредных веществ, ядовитых жидкостях и других вредных веществах.

Конечной целью анализа и моделирования процесса распространения энергии и вредного вещества служит построение полей пространственно-временного распределения плотности их потоков или концентрации, а также зон возможного поражения.

Детальное рассмотрение техногенных происшествий следует проводить после декомпозиции всего процесса формирования поражающих факторов, наносящих ущерб человеческим и материальным ресурсам.

Можно выделить следующие четыре этапа или стадии:

- 1) высвобождение накопленной в человеко-машинной системе энергии или запасов вредного вещества вследствие возникшей там аварии;
- 2) неконтролируемое распространение (трансляция) их потоков в новую для них среду и перемещение в ней;
- 3) их дальнейшее физико-химическое превращение (трансформация) с дополнительным энерговыделением и переходом в новое агрегатное или фазовое состояние;
- 4) разрушительное воздействие (адсорбция) первичных потоков и/или наведенных ими поражающих факторов на не защищенные от них объекты [1].

Рассмотрим эти этапы подробнее. Параметры, характеризующие

тот или иной этап, должны учитываться в моделях, положенных в основу информационно-измерительной и управляющей системы экологического мониторинга.

Характеристика первого этапа, т. е. процесса высвобождения аварийно-опасных энергии и вещества, накопленных в объектах техносферы, складывается из ответов на следующие вопросы:

- а) что высвобождается;
- б) откуда или из чего оно истекает;
- в) каким образом это случилось или происходит.

При этом основное внимание при ответе на каждый из них будет уделено со ответственно физико-химическим свойствам вещества или энергии, их высвобождающемуся количеству и динамике (изменению во времени) рассматриваемого процесса.

Возможны такие основные варианты ответа на эти вопросы:

а) твердое тело или вещество — газообразное, жидкое, газокпельное или порошкообразное, которое может быть инертным и неинертным или меняющим и не меняющим свое агрегатное состояние после высвобождения, а также энергия — в форме движущихся тел или потока невидимых частиц-волн;

б) из генератора (компрессора, насоса, источника энергии) или аккумулятора (емкости) — через образовавшуюся в них трещину либо отверстие;

в) практически мгновенно (залповый выброс), непрерывно — с постоянным или переменным расходом и эпизодически — регулярно или случайным образом.

Целью анализа и моделирования этой стадии может служить прогнозирование таких ее параметров, как количество внезапно или постепенно высвободившегося вредного вещества, интенсивность и продолжительность его истечения, а также плотность потока тел либо частиц и напряженность электромагнитных полей или ионизирующих излучений.

Особенности протекания второго этапа рассматриваемого процесса, т.е. распространение опасных потоков, обусловлены как перечисленными только что факторами, так и спецификой пространства, заполняемого веществом или находящегося между источником энергии и подверженным ее воздействию объектом. Чаще всего это пространство может быть трехмерным (атмосфера, водоем, почва), иметь заполнение — неоднородное или однородное, неподвижное или подвижное (несущую среду), обладать фактически бесконечными размерами или ограничиваться другой средой, способной поглощать или отражать потоки энергии или вещества.

С учетом данного обстоятельства возможны различные сочетания существенных для процессов энергомассообмена и потокообразования факторов, приводящих к различным сценариям, начиная с растекания жидких веществ по твердой поверхности и завершая заполнением всего про-

странства смесью аэрозоли, газа и/или жидкости.

Рассмотрим, например, сценарии, связанные с распространением химических веществ в воздушной среде. Сложность модели здесь может быть различна, и это во многом зависит от принятых допущений. В частности, возможны следующие варианты постановки задачи.

1) Принимается допущение о неподвижности атмосферы. В этом случае можно выделить основные особенности распространения газообразных веществ. Они проявляются обычно в образовании либо облака (для залпового выброса газов), либо шлейфа (для их непрерывного истечения), которые затем ведут себя соответственно следующим образом:

а) стелятся над поверхностью или постепенно приближаются к ней (тяжелые газы);

б) касаются земли или распространяются параллельно поверхности (газы, плотность которых близка к плотности воздуха;

в) поднимаются в виде гриба или расширяющегося конуса, поперечные сечения которых называются «термиками» («термик» - интенсивно перемешиваемое образование с поднимающимися легкими потоками внутри и опускающимися из-за охлаждения более плотными окружающими газами (легкие газы).

2) Учитывается подвижность атмосферы как несущей среды и характер подстилающей ее поверхности.

Подвижность атмосферы характеризуется скоростью ветра u_x , скоростью переноса v_x , вертикальной устойчивостью.

Характер подстилающей поверхности обусловлен рельефом местности, шероховатостью поверхности [1].

Этих факторы слегка видоизменяют процесс распространения облака. Обычно это приводит к дрейфу шлейфа или облака атмосфере с постепенным изменением их высоты и формы примерно так, как это показано на рис. 1. Причины тому — действие архимедовых и сил, а также размыв поверхности этих образований за счет трения о поверхность земли и турбулентного рассеяния газов в процессе так называемой атмосферной диффузии (турбулентная диффузия).

Величина трения о земную поверхность обычно зависит от размеров зданий, оврагов, деревьев, кустов и других естественных шероховатостей.

Влияние атмосферы определяется направлением и скоростью циркулирующих в ней потоков, в том числе потока тепловой энергии.

В качестве других исходных данных применяются различные сценарии и факторы, а также количественные характеристики, полученные при исследовании первого этапа процесса формирования поражающих факторов.

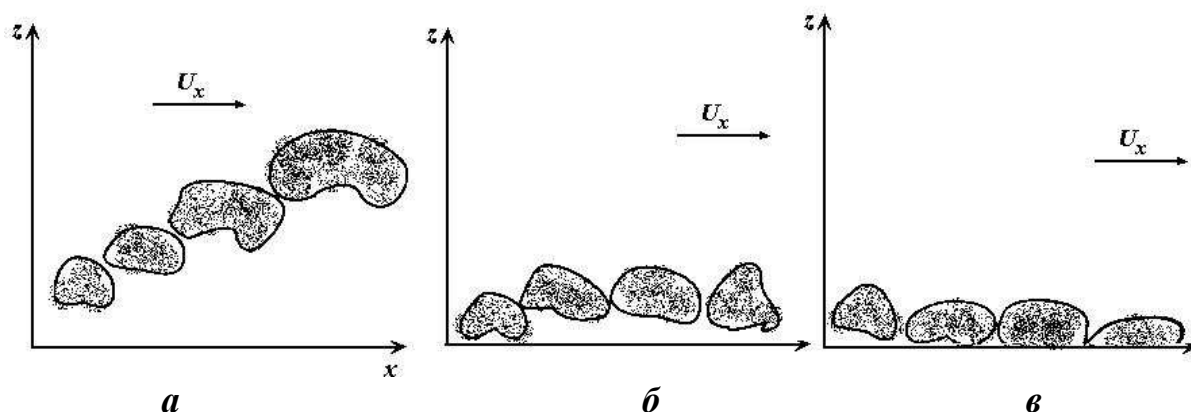


Рис. 1. Распространение облака АХОВ в атмосфере: а – легкий газ; б – газ равный по плотности воздуху; в – тяжелый газ

Третий этап. Трансформация аварийно высвободившихся потоков энергии и запасов вредного вещества зависит от большого числа указанных выше факторов и их вероятных сочетаний. Однако доминирующее положение среди них занимают те физико-химические свойства распространившихся в новой среде продуктов выброса, которые характеризуют их взаимную инертность. В противном случае в образовавшихся или изменившихся под их воздействием объемах пространства возможны не только различные фазовые переходы типа «кипение — испарение» но и химические превращения в форме горения или взрыва, сопровождающиеся большим выделением энергии.

Здесь следует особо выделить два случая:

большие проливы аварийно химических опасных веществ, заполнения их парами сравнительно небольших объемов воздушного пространства.

И в том и в другом случае могут создаваться топливовоздушные смеси, способные к трансформации в одной или нескольких из упомянутых выше форм («кипение - испарение», «горение/взрыв»). Например, залповый выброс значительного количества сжиженного углеводородного газа сопровождается практически мгновенным испарением с образованием смеси, способной затем (после контакта с открытым огнем) взорваться или интенсивно сгореть.

Целью анализа и моделирования данной стадии рассматриваемого процесса служит прогнозирование не только характера трансформации вредных веществ, рассеянных в результате аварии, но и поражающих факторов, обусловленных последующим превращением в новой для них среде.

Четвертой стадией и конечной целью всего исследования процесса причинения техногенного ущерба является изучение поражающего воздействия первичных и вторичных продуктов аварийного выброса на незащищенные от них людские, материальные и природные ресурсы (собственно нанесение ущерба). Основными используемыми при этом исходными дан-

ными являются параметры:

а) поражающих факторов (перепад давления во фронте воздушной ударной волны, концентрация токсичных веществ, интенсивность тепловых и ионизирующих излучений, плотность потока и кинетическая энергия движущихся осколков),

б) потенциальных жертв (стойкость и живучесть конкретных объектов, с учетом частоты или длительно вредного воздействия на них и качества аварийно-спасательных работ).

Сам же ущерб от такого воздействия целесообразно делить на два вида:

а) прямой или непосредственный ущерб, обусловленный утратой целостности или полезных свойств конкретного объекта, и

б) косвенный, вызванный разрушением связей между ним и другими объектами.

Несмотря на определенную условность и нечеткость, приведенная классификация помогает убедиться как в многогранности проявления техногенного ущерба, так и в его зависимости от большого числа перечисленных факторов. Это позволяет привлечь для исследования самые разнообразные модели и методы.

Современная концепция обеспечения безопасности рассматривает потенциально опасные объекты (ПОО) как единую интегрированную систему. Информационно-измерительная и управляющая система экологического мониторинга в данном случае должна выполнять как информационные функции (сбор и обработка информации и ее представление персоналу в удобной форме), так и управляющие функции (безопасность, автоматическое управление и регулирование, блокировка, дистанционное управление во всех режимах работы ПОО) [2].

Как правило, чрезвычайные ситуации возникают неожиданно. Это происходит в результате внезапного выхода из строя деталей, механизмов, машин и агрегатов и может сопровождаться серьезными нарушениями производственного процесса, взрывами, катастрофическими затоплениями, образованием очагов пожара, радиоактивным, химическим заражением местности и т.д.

Исходным действием, с которого начинается управление, обычно считают выработку и принятие решения. Это действие предполагает:

определение цели управления;

оценку обстановки и исходного состояния, в котором находится объект управления;

прогнозирование развития ситуации;

определение и оценку последовательности действий, которые в совокупности должны привести к достижению цели управления;

принятие наиболее рациональной (по предварительным оценкам) последовательности действий в качестве управленческого решения.

При оценке выбираемого решения основную роль играет определение ресурсных возможностей реализации этого решения, к которым относятся силы и средства, финансовые затраты, объем затрат, а также их распределение.

В процессе управления руководителем принимается огромное количество самых разнообразных решений, обладающих различными характеристиками. Тем не менее, существуют некоторые общие признаки, позволяющие это множество определенным образом просчитать и выбрать наиболее верное решение. Насколько правильным будет выбор, зависит от качества данных, используемых при описании ситуаций, в которых принимается решение.

Используя все возможные варианты решения проблемы, можно сформулировать «поле альтернатив». Однако на практике руководитель редко располагает достаточными знаниями или временем, чтобы сформулировать и оценить каждую альтернативу, поэтому он, как правило, ограничивает число вариантов сравнения всего несколькими альтернативами, которые представляются наиболее подходящими [3].

Процесс принятия решений может принадлежать к одному из трех возможных условий:

1. Принятие решений в условиях определенности, когда данные известны точно.
2. Принятие решения в условиях риска, когда данные можно описать с помощью вероятностных распределений.
3. Принятие решений в условиях неопределенности, когда данным нельзя приписать относительные веса, которые показывали бы степень их значимости в процессе принятия решений.

Для поэтапного моделирования на примере исследования возникновения и процесса развития чрезвычайной ситуации, связанной с выбросом аварийно химически опасных веществ, необходимо разработать комплекс смысловых и знаковых моделей, позволяющих установить основные закономерности возникновения чрезвычайных ситуаций и количественно оценить меру возможности их появления. Это можно сделать, используя модифицированные сети Петри.

Модели должны [1, 4-7]:

- а) выявлять условия появления и предупреждения происшествий;
- б) вычислять вероятность их появления.

Исходные данные: параметры химически опасного объекта (X), людских ресурсов (L), сил и средств ликвидации ЧС (C), вероятность аналогичных ЧС ($Q(t)$).

Исходные гипотезы и предпосылки относительно моделируемого явления:

- а) чрезвычайная ситуация может быть описана в соответствии с канонами теории случайных процессов в сложных системах;

б) объектом моделирования должен быть случайный процесс, возникающий на химически опасном объекте и завершающийся появлением происшествий (аварий или чрезвычайных ситуаций);

в) поток таких происшествий допустимо считать простейшим, т.е. удовлетворяющим условиям стационарности, ординарности и отсутствия последствий;

г) каждое происшествие может возникать при выполнении конкретных технологических операций, из-за случайно возникших ошибок персонала, отказов техники и нерасчетных внешних воздействий.

С учетом вышеизложенного можно сформулировать концептуальную постановку задачи моделирования следующим образом:

а) представить процесс развития чрезвычайной ситуации в виде процесса просеивания потока заявок $\omega(t)$ на конкретные химически опасные объекты в выходной поток случайных происшествий с вероятностью $Q(t)$ их появления в момент времени t ;

б) изобразить данный процесс в виде потоков (графа, интерпретирующего возникновение причинной цепи происшествий из отдельных предпосылок).

Формулировка задачи моделирования в виде системы алгебраических уравнений и проверка корректности математических соотношений, с учетом гипотезы о простейшем характере потока требований на функционирование химически опасного объекта и использованием свойства его инвариантности после разрежения за счет исключения событий для получения зависимостей может быть представлена в следующем виде:

$$Q(t) = f(X, L, C, T, t).$$

Далее разрабатывается процедура априорной оценки каждого из параметров аналитической модели и проверяется корректность всех полученных математических соотношений с применением всех соответствующих правил.

Задачами управления в режиме чрезвычайной ситуации являются оперативное реагирование на ситуацию и выработка действий по уменьшению или полной ликвидации последствий чрезвычайной ситуации. Алгоритм отбора комбинаций ликвидационных мероприятий позволяет:

оптимизировать сценарий ликвидации чрезвычайной ситуации;

эффективно и обоснованно выбирать план ликвидации на основе полученных прогнозных оценок и потерь;

управлять оптимальным размещением сил и средств для ликвидации поражающих факторов чрезвычайной ситуации;

моделировать причинно-следственные связи между возникающими поражающими факторами и др.

При этом в нормальном режиме работы ситуационным центром должны осуществляться следующие мероприятия:

сбор информации для прогнозирования возможного развития чрез-

вычайной ситуации и ее последствий;

 построение модели на основании собранной информации;

 проведение нескольких циклов моделирования;

 разработка на основании проведенного моделирования различных превентивных планов, позволяющих эффективно реагировать на возникающие проблемы.

Кроме того, следует накапливать сведения о ресурсах, необходимых для ликвидации проблем.

Благодаря методу моделирования возникновения неисправности на ПОО и процесса устранения неисправности, основанному на использовании сетей Петри, процесс моделирования программного и аппаратного обеспечения будет являться эффективным и наглядным.

Поскольку алгоритм функционирования сети Петри может быть легко формализован, существуют и продолжают разрабатываться различные программы ЭВМ, моделирующие функционирование сетей Петри.

Материалы подготовлены в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук и докторов наук (Конкурс 2013-2014 годов).

Список литературы

1. Лекции по системному анализу и моделированию в чрезвычайных ситуациях // 4044F_lekcii_po_sistemnomu_analizu_i_modelirovaniyu_v_chs (дата обращения: 15.06.2013).

2. Моделирование интегрированных систем комплексной безопасности потенциально опасных объектов/ Н.Г. Топольский, А.В.Фирсов, А.Т. Рвачёв, А.В. Слабченко // Пятнадцатая научно-техническая конференция «Системы безопасности» СБ-2006 <http://www.agps-2006.narod.ru/konf/2007/sb-2007/sec-1-07/30.1.07.pdf>.

3. Принятие управленческих решений в условиях определенности Н.М. Мамедов, Е.И. Сухорукова // vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V3/5.pdf (дата обращения: 15.06.2013).

4. Системная динамическая модель управления процессом ликвидации кризисных ситуаций с использованием сетей Петри/ Колесников Д.А., Симанков В.С.// Программные продукты и системы. №1, 2010.

5. Разработка методов оценки, прогнозирования и предупреждения развития чрезвычайных ситуаций техногенного характера/ А.А. Горюнкова [и др.]// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 4-2. С. 259-265.

6. Разработка математических моделей развития чрезвычайных ситуаций техногенного характера и снижения риска их возникновения/ А.А. Горюнкова [и др.]// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 4-2. С. 251-258

7. Метод интегральной оценки территориального загрязнения приземного слоя атмосферы горнопромышленного региона/ А.А. Горюнкова [и др.]/ Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. № 6-2. С. 504-511.

Горюнкова Анна Александровна, канд. техн. наук, доц., anna_zuykova@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

**APPROACHES AND METHODS FOR SIMULATION
OF DECISION MAKING IN EMERGENCIES**

A.A. Goryunkova

The stages of the formation of damaging factors, nano-generating damage to the human and material resources are the parameters that characterize a particular stage, which are accounted for in the models that formed the wasps nova information measurement and control system of environmental monitoring, consider the conditions and the process of decision-making in emergency situations.

Key words: emergency, decision making, Petri net by a system analysis, environmental.

Goryunkova Anna Alexandrovna, candidate of technical science, docent, anna_zuykova@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 629.7.01.533.6

**МЕТОД АВТОМАТИЗАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ
САМОЛЕТА**

А.В. Ордин, А.В. Рипецкий, А.Е. Щеляев

В настоящей работе даны материалы по разработке методики автоматизации и оптимизации проведения акустических испытаний летательного аппарата и ее интеграции с современными системами автоматизированного проектирования (САПР).

Ключевые слова: акустические испытания самолета, САПР, управление жизненным циклом изделия, акустическое поле.

Стадия летных испытаний самолета является неотъемлемым и важным этапом ввода его в эксплуатацию, поддержания его летной годности в процессе эксплуатации. Одной из важных стадий испытаний самолета являются акустические замеры в полете и на земле с целью определения уровня звукового давления, действующего на самолет и оценки его ресурсных характеристик[2].

Опытные исследования акустических колебаний, проводимые на специализированных стендах, и в ходе наземных и летных испытаний, как правило, оказываются дорогостоящими, трудоемкими и длительными [4]. Модельные стендовые испытания не всегда позволяют воссоздать необходимые нагрузки, в то время как натурные наземные и летные испытания не обеспечивают допустимую надежность измерений. Кроме того, в фактических условиях эксперимента исследуемые области конструкции не всегда могут быть должным образом оснащены измерительными приборами и, как следствие полные данные пространственного распределения измеряемых параметров фактически не могут быть получены.

Проведение отдельных опытных исследований достаточно трудная задача. В частности это относится к исследованию пульсаций давления в воздухозаборниках сверхзвуковых самолетов или к еще более сложному типу экспериментов, относящиеся к конструированию гиперзвуковых самолетов. Для проведения таких экспериментов необходимо строительство сложных инженерных сооружений или даже комплексов.

Одним из рабочих подходов в промышленности на текущий момент является сравнение результатов математического моделирования и поле-

вых испытаний.

Современная концепция управления жизненным циклом изделия подразумевает поэтапную автоматизацию всех этапов цикла разработки, производства и эксплуатации изделия. Автоматизация планирования и проведения эксперимента также является неотъемлемой частью дисциплины автоматизации проектно-конструкторских работ. В части проведения акустических экспериментальных исследований можно отметить существующую высокую трудоемкость его проведения из-за наличия ряда факторов:

- Установка микрофонов для замеров акустического поля (в отличие от тензодатчиков, которые устанавливаются в цеху) производится непосредственно перед испытаниями, зачастую в условиях нехватки времени;
- Записывающая аппаратура требует высокой квалификации оператора, производящего контроль замеров акустического поля;
- Микрофоны требовательны к соблюдению технологии их установки на летательный аппарат [3]

Пульсации давления потока, действующие на конструкцию, описываются их среднеквадратичным уровнем σ_p спектральной плотностью $G_p(f)$ и пространственными характеристиками. Эти параметры и характеристики, в первую очередь σ_p , зависят от условий полета.

Пристальное внимание к акустическим колебаниям в последнее время объясняется внедрением нового поколения сверхзвуковых пассажирских и гиперзвуковых самолетов. Сложность обеспечения акустической прочности гиперзвуковых самолетов связана с высокими нагрузками и применением внешней теплоизоляции, состоящей из материалов с низкими прочностными свойствами.

Проведенный анализ рынка систем автоматизированного проектирования (САПР) показал практическую неприменимость предлагаемых программных продуктов для решения проектных задач на стадиях летных испытаний.

Актуальность проблемы и возможность ее решения на принципиально новом техническом уровне обусловили выбор темы исследования. Объективно существующие противоречия между повышением качества проектных работ, сокращением сроков проектирования и снижением материальных затрат привели к необходимости поиска новых методов и средств автоматизации проведения акустических испытаний самолета. Решение данной задачи потребовало разработки принципиально нового класса программных продуктов, позволяющих инженеру-проектировщику (а не профессионалу-акустику) в минимальные сроки рассмотреть множество альтернативных компоновочных решений и оценить их влияние на подготовку и проведение испытаний самолета. В результате, соискателем была создана автоматизированная система анализа компоновочных решений

технологической оснастки акустического эксперимента самолета, испытывающего широкополосные нагрузки в акустическом диапазоне частот (АСАРТП ЛА), решающая перечисленные задачи в соответствии с предъявляемыми требованиями.

Разработанный авторами статьи метод усовершенствования решения PLM, предназначенные для управления жизненным циклом продукта, позволили компании ОАО «Авиационный комплекс им. С. В. Ильюшина» и ее партнерам использовать новейшие высокотехнологичные инструменты и процессы, которые были необходимы для решения задач, связанных с созданием нового высокотехнологичного самолета Ил-476 (рис. 1).



Рис. 1. Фотография первого полета Ил-476.

Процесс замера уровней акустического поля науко- и трудоемкий, со множеством усложняющих факторов такими как:

1. Установка микрофонов для замеров акустического поля (в отличие от тензодатчиков, которые устанавливаются в цеху) производится непосредственно перед испытаниями. Зачастую в условиях нехватки времени;
2. Записывающая аппаратура требует высокой квалификации оператора, производящего контроль на борту замеров акустического поля;
3. Микрофоны требовательны к качеству технологии установки на летательный аппарат [3]

Это приводит к большому числу повторных замеров, вылетов, а следовательно к затрате временных и денежных ресурсов [1].

Разработанная методика расстановки микрофонов позволяет автоматизировать и оптимизировать по критерию технологичности расстановку микрофонов для акустических замеров. Используя данные AcousticXpert (Россия) или другой САЕ (Computer-aided engineering — общее название для программ и программных пакетов, предназначенных для решения раз-

личных инженерных задач: расчётов, анализа и симуляции физических процессов) удовлетворяющих требованиям авиационной акустики, мы получаем поле значений акустического давления в дБ (с разрешающей способностью до 0,001 дБ). Вводим уточнения по акустической аналогии Лайт-хила:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - c^2 \Delta\right)p = \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{\partial F_i}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}, \quad (1)$$

$$T_{ij} = \rho V_i V_j + \Delta(P - c^2 p). \quad (2)$$

Затем вводим ограничения по разрешающей способности измерительной аппаратуры (микрофонов, записывающего устройства) в единицах дБ. Вводим ограничения экспериментальные по способу установки микрофонов (под обшивку, в обшивку, на обшивку) в единицах дБ. Критерий качества процесса методика определяет как то, что кол-во микрофонов должно быть не меньше, чем количество областей усредненного давления. САПР, анализируя цифровую модель самолета, строим сетку в узлах которой будем располагать микрофоны[6], параметризируем ее, вводя данные по распределению акустического давления в дБ и данные по технологической оснастке (разрешающая способность микрофонов, способ размещения микрофонов вглубь, размещение тензодатчиков) автоматизировано выводит пользователю координаты установки микрофонов, площади поверхностей с усредненным уровнем акустического давления в дБ (по разрешающей способности оснастки) с координатами центров этих площадей. На выводе данные сводятся в таблицу (см. таблица1) данных и предоставляет возможность раскраски цифровой модели по площадям с одинаковым уровнем дБ см. рис. 2, таким образом создавая 3D акустическую карту, с возможностью 2D проекции, которую возможно использовать для создания новых образцов авиационной техники в качестве прототипа которой будет использоваться существующий самолет [5].

Таблица 1

Результирующая таблица расстановки микрофонов для проведения акустических испытаний

№ п.п	Агрегат	Координаты	Способ установки	Уровень звукового давления SPL, Дб
1	Киль1	x;y;z (2;3;7)	Под обшивку	102
2	Киль1	x;y;z (1;1;7.5)	Под обшивку	114
3	Киль1	x;y;z (1;1;7.5)	Под обшивку	124
4	Крыло1	x;y;z (2;3;7)	Под обшивку	102
5	Крыло1	x;y;z (1;1;7.5)	Под обшивку	114
6	Крыло1	x;y;z (1;1;7.5)	Под обшивку	124
.....				
п	Носовая часть	x;y;z (1;1;7.5)	Под обшивку	124



Рис.2. Пример экспресс акустической карты Ил-476, выполненной с помощью разработанного программного комплекса

Структурная схема алгоритма программы представлена на рис. 3.



Рис. 3. Структурная схема алгоритма программы автоматизации расстановки микрофонов для акустических испытаний

Структурная схема алгоритма содержит две субпрограммы, речь о которых пойдет ниже.

Субпрограмма 1 (Автоматизации установки микрофонов по полю расчетных уровней звукового давления). Описание субпрограммы 1:

Ввод объединяющих значений (если значение в узле(i) и узле (i+1) меньше, чем на дельту заданную оператором в Дб (в зависимости от планируемой точности и возможности размещения микрофонов), то присваиваем узлу узле(i) и Узлу (i+1) принадлежность одной плоскости с усредненным значением (усредненной значение получается алгебраическим путем из суммы узлов попавших в плоскость поделенных на число узлов вошедших в плоскость)).

Строим плоскость параллельную поверхности агрегата летательного аппарата, определяем центр поверхности, проецируем его на поверхность агрегата, как предполагаемое место установки микрофона. Присваиваем месту установки микрофона имя $M(i)$ и координаты от реперной точки агрегата. Реперную точку устанавливает оператор ПК. Строим сетку №2 на агрегате летательного аппарата в узлах которой размещаем места установки микрофонов $M(i)$.

Субпрограмма 2 (Оптимизация расстановки микрофонов по технологической оснастке). Описание субпрограммы 2:

На агрегате летательного аппарата строим сетку №3, узлы которой связываем с тензодатчиками, установленными на агрегате летательного аппарата. Накладываем сетку №3 на сетку №2. Вводим ограничения по

возможности изменения размещения K , по умолчанию радиус перемещения должен быть меньше четверти расстояния от $M(i)$ до $M(i+1)$ (Кратчайшее расстояние между двумя ближайшими микрофонами).

Определяем ближайший тензодатчик $T(i)$ к микрофону $M(i)$, строим линию кратчайшую, если Расстояние $M(i)$ До $T(i)$ Меньше K , то перемещаем $M(i)$ В координаты $T(i)$, если расстояние больше, то передвигаем $M(i)$ по линии $(M(i)T(i))$ На расстояние K .

Подключение модуля автоматизированной подготовки проведения акустических замеров самолета производится, благодаря средствам SolidWorks API.

SolidWorks API — это интерфейс прикладного программирования, позволяющий разрабатывать пользовательские программы на платформе САПР SolidWorks

Задача оптимизации принимает вид:

$$\begin{aligned} X^* &= \text{Arg Min } F(x; u). \\ x &\in X \\ u &\in U \end{aligned} \quad (3)$$

где X – матрица конструктивных параметров (таких как топология расположения записывающей аппаратуры); U – вектор ограничений (площадь поверхности, суммарный уровень шума, ограничения технологической оснастки эксперимента).

Проведенный анализ основных принципов построения САПР позволил сформулировать требования, предъявляемые к системе экспресс-анализа на этапе концептуального проектирования.

Программная реализация, работающая на уровне единой информационной модели с средствами геометрического моделирования, доказывает реальные практические преимущества интегрированных комплексов по сравнению с традиционными решениями.

Верификация алгоритмов и проведенные проектные исследования показали, что система соответствует заданным техническим требованиям и обеспечивает получение достоверных результатов, которые представляются в текстовом и графическом виде, максимально удобном для проектировщика.

Внедрение разработанного программного комплекса привело к сокращению времени планирования акустического эксперимента в три раза.

Разработанные методы экспресс-анализа вариантов расстановки микрофонов, а также алгоритмы и программный комплекс, внедрены в ОАО «Ил», ОАО «РСК «МиГ»», в подразделении «Хруничев-Телеком», на каф. 904 «Инженерная графика» МАИ, что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Список литературы

1. В.Е. Гмурман. Теория вероятностей и математической статистики. М. Высшая школа, 1977.
2. ГОСТ РВ 20.57305-98. Методы испытаний на воздействие механических факторов.
3. Гевонден Г.А., Кисилев Л.Т. Приборы для измерения колебаний. М. Машгиз, 1962.
4. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. М.: «Мир», 1980.
5. Ордин А.В., Рипецкий А.В. Автоматизированная система акустического расчета тонкостенных пластин летательного аппарата. Известия Тульского Государственного университета. Вып. 9, 2012. С. 206-214.
6. Gerald Farin. Curves and Surfaces for CAGD, Fifth Edition: A Practical Guide (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics), Arizona State University, 2002.

Ордин Алексей Вячеславович, асп., 123land@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Рипецкий Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доц., 123land@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Щеляев Александр Евгеньевич, менеджер отдела вычислительной гидродинамики, alex@flowvision.ru, Россия, Москва, ООО «ТЕСИС»

THE AUTOMATION TECHNIQUE FOR AIRCRAFT ACOUSTIC TESTS.

A.V. Ordin, A.V. Ripetskiy, A.E. Shchelyaev

This article deals with the materials on development of the method for aircraft acoustical testing automation and optimization and its integration with modern CAE systems.

Key words: aircraft acoustical testing, CAGD, Product Lifecycle Management, acoustic field.

Ordin Aleksey Vjacheslavovich, postgraduate, 123land@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow aviation Institute (national research University),

Ripeckij Andrey Vladimirovich, candidate of technical Sciences, docent, 123land@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow aviation Institute (national research University),

Shheljaev Alexander Evgenievich, Manager of the Department of computational hydrodynamics, alex@flowvision.ru, Russia, Moscow, ООО «TESIS»

МЕТОД КОНТРОЛЯ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ СВОЙСТВ ПРИ ОКИСЛЕНИИ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ

Б.И. Ковальский, В.С. Янович, В.Г. Шрам

Представлены результаты триботехнических испытаний трансмиссионных масел различной базовой основы. Предложен критерий противоизносных свойств, учитывающий концентрацию продуктов окисления.

Ключевые слова: диаметр пятна износа, коэффициент поглощения светового потока, критерий противоизносных свойств, скорость формирования площади фрикционного контакта.

При эксплуатации агрегатов трансмиссий к основным факторам влияющим на надежность, относятся нагрузка, температура и скорость скольжения. Температурные условия эксплуатации трансмиссий зависят не только от внешних условий, но главным образом от нагрузки и скорости скольжения.

Под действием температуры происходят процессы окисления, деструкции и химические реакции их продуктов с металлическими поверхностями.

Основными элементами трансмиссий являются зубчатые передачи и подшипники качения, поэтому в них реализуется граничная и эластогидродинамическая смазка и основным видом изнашивания является – усталостное, а опасным повреждением – заедание, приводящее к необратимым разрушениям поверхностей контактирующих деталей.

По данным [1], заедание является трехстадийным процессом. На первой стадии происходит разрушение эластогидродинамической пленки, разделяющей трущиеся поверхности, а при дальнейшем ужесточении режимов эксплуатации – разрушение граничных смазочных слоев. Второй стадией заедания является схватывание и разрушение обнажившихся вершин микронеровностей на отдельных участках поверхностей контактирующих тел. Третьей стадией является необратимое схватывание и повреждение активных участков поверхностей деталей.

На первой стадии заедания [2] переход к нему осуществляется обычно при невысоких скоростях от эластогидродинамической смазки к граничной, а затем к режиму заедания. На трехстадийную модель заедания смазанных тяжелонагруженных трибосопряжений существенное влияние оказывает температура и качество смазочного материала и подтверждается исследованиями Г.В. Виноградова [3], Б.И. Костецкого [4], В.Н. Калуева [5], и И.В. Крагельского [6]. Целью настоящих исследований является определение влияния продуктов окисления трансмиссионных масел на их противоизносные свойства.

Для исследования выбраны трансмиссионные масла различной базовой основы: минеральное Bizol 80W-90GL4; частично синтетическое Bizol Hypoid 75W-90GL4, GL5 и синтетическое Bizol Hypoid 75W-90GL5.

Масла предварительно окислялись при температуре 150 °С, с перемешиванием мешалкой с частотой вращения 300 ± 2 об/мин. Степень окисления определялась фотометрическим методом по коэффициенту поглощения светового потока. Окисленные масла массой 15 г испытывались на трехшариковой машине трения [7] со схемой “шар-цилиндр”. Параметры трения составляли: нагрузка – 13Н; скорость скольжения – 0,68 м/с; температура масла в объеме – 80 °С; время испытания – 2 часа.

На рис.1, а представлены зависимости диаметра пятна износа от коэффициента поглощения светового потока, характеризующего концентрацию продуктов окисления. Установлено, что для минерального масла (кривая 1) противоизносные свойства повышаются с увеличением коэффициента поглощения светового потока и превышают противоизносные свойства товарного масла (точка на ординате) на 21%. Для частично синтетического масла (кривая 2) при значениях коэффициента $K_n < 0,2$ ед. противоизносные свойства понижаются, а при значениях $K_n > 0,2$ ед. – повышаются и превосходят товарное масло (точка на ординате) на 13,8 %.

Для синтетического масла (кривая 3) при значениях $K_n < 0,2$ ед. противоизносные свойства соответствуют товарному маслу (точка на ординате), а при значениях K_n от 0,3 до 0,6 ед. они понижаются и повышаются при значениях $K_n > 0,6$ ед. Повышение противоизносных свойств масел вызвано образованием при окислении смолистых веществ, которые адсорбируются во впадинах микронеровностей поверхностей, образуя гидравлическую “подушку”, разделяющую поверхности трения и уменьшающую износ. Этот механизм характерен для минерального и частично синтетического масел. Для синтетического масла смолистые вещества, за данное время испытания, не обнаружены при их центрифугировании, поэтому при значениях коэффициента $K_n > 0,3$ износ повышается. При центрифугировании окисленных минеральных и частично синтетических масел осадок принимает гелеобразное состояние, что объясняет повышение противоизносных свойств.

Для оценки противоизносных свойств трансмиссионных масел предложен критерий Π , определяемый эмпирическим отношением

$$\Pi = K_n/U, \quad (1)$$

где K_n – коэффициент поглощения светового потока; U – среднеарифметическое значение диаметров пятен износа на трех шарах, мм.

Данный критерий характеризует концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта, зависимость которого (рис.1, б) описывается линейным уравнением

$$\Pi = aK_n, \quad (2)$$

где a – коэффициент, характеризующий скорость изменения критерия Π от концентрации продуктов окисления.

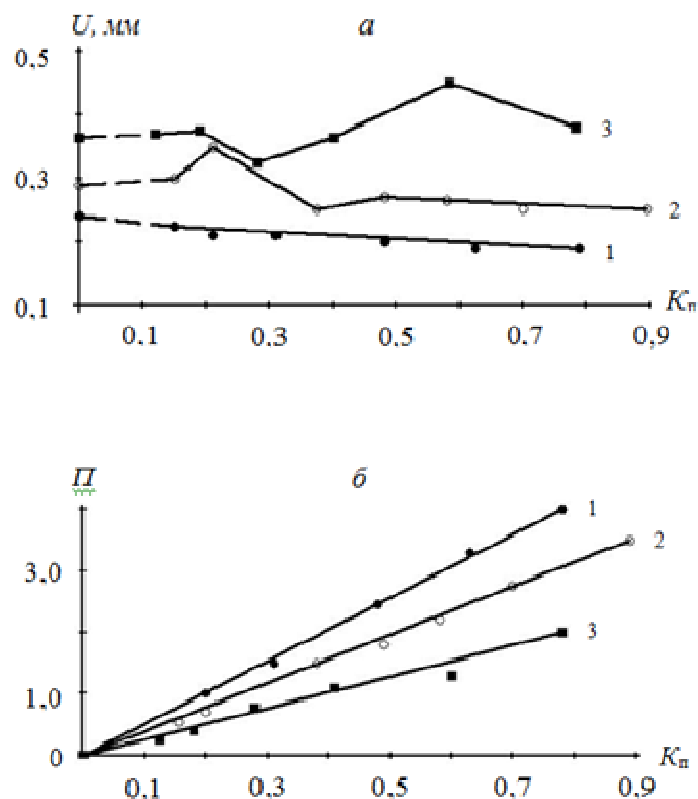


Рис. 1. Зависимости диаметра пятна износа $U(a)$ и критерия противоизносных свойств $\Pi(b)$ от коэффициента поглощения светового потока K_n при испытании окисленных трансмиссионных масел: 1 – минерального Bizol 80W-90GL4; 2 – частично синтетического Bizol Hypoid 75W-90GL4, GL5; 3 – синтетического Bizol Hypoid 75W-90GL5

Регрессионные уравнения для исследованных масел имеют вид:
Минерального

$$\Pi = 5K_n \quad (3)$$

Частично синтетического

$$\Pi = 3,857K_n \quad (4)$$

Синтетического

$$\Pi = 2,571K_n \quad (5)$$

Коэффициент корреляции 0,92.

Согласно уравнений 3-5 наибольшая скорость изменения критерия противоизносных свойств установлена для минерального масла, а наименьшая – синтетического, т.е. концентрация продуктов окисления на но-

минальной площади фрикционного контакта, при одинаковом значении коэффициента K_n , больше у первого масла, чем у второго за счет меньшей площади пятна износа, поэтому чем больше скорость изменения критерия L , тем выше противоизносные свойства исследуемого масла.

Применение схемы трения “шар-цилиндр” в трехшариковой машине трения, причем каждый из трех шаров контактирует с поверхностью цилиндра по индивидуальной дорожке, обеспечивает изучение падения давления с увеличением площади контакта. В этом случае продукты окисления трансмиссионных масел оказывают влияние на время формирования площади фрикционного контакта, поскольку при малых площадях (в начале испытания) давление в контакте вызывает пластическую деформацию, переходящую в упругопластическую, а затем в упругую с увеличением площади контакта шаров с цилиндром.

Для определения времени формирования площади контакта (наступления упругих деформаций) через пары трения пропусклся постоянный ток (100 мкА) от внешнего стабилизированного источника питания 3В, задаваемого при статическом положении пар трения [8]. Поэтому в процессе трения в зависимости от давления в контакте и влияния смазочного материала, электрическое сопротивление контакта изменяется, что влияет на величину тока. При пластических деформациях в контакте сопротивление минимально и ток равен заданному. С увеличением площади контакта пластические деформации переходят в упругопластические при этом образуется граничный слой, увеличивающий электрические сопротивления контакта, а значит уменьшение тока, протекающего через этот слой. С переходом к упругим деформациям величина тока стабилизируется и зависит от свойств смазочного материала (концентрации продуктов окисления, температурной деструкции, активации присадок, кислотного числа, влаги, коррозионных свойств). Поэтому при наступлении упругих деформаций в контакте происходит медленное окислительное изнашивание, характеризующееся формированием и разрушением защитных пленок на поверхностях трения. Таким образом время формирования фрикционного контакта определяется суммарной продолжительностью пластической и упругопластической деформациями которое определяется из диаграмм записи изменения тока, протекающего через фрикционный контакт.

На рис. 2 приведены зависимости времени формирования площади фрикционного контакта в зависимости от концентрации продуктов окисления, выраженных коэффициентом поглощения светового потока K_n . Независимо от базовой основы наблюдаются общие закономерности изменения времени формирования фрикционного контакта $t_{ФПК}$.

Так, в начале окисления время увеличивается по сравнению с товарным маслом (точки на ординате). Увеличение времени $t_{ФПК}$ зависит от базовой основы масла и концентрации продуктов окисления (K_n). Так, для минерального масла время $t_{ФПК}$ составило 33 минуты при $K_n = 0,21$ ед;

частично синтетического 29 мин при $K_n = 0,15$ ед. и синтетического 6 мин при $K_n = 0,12$ ед. Дальнейшее увеличение концентрации продуктов окисления вызывает уменьшение времени $t_{ФПК}$ для минерального масла за весь период испытания, причем в диапазоне значений коэффициента K_n от 0,3 до 0,78 ед., время $t_{ФПК}$ составляет меньше 10 минут. Для частично синтетического и синтетического масел характерно циклическое изменение времени $t_{ФПК}$ уменьшение-увеличение и повторное уменьшение, причем для синтетического масла время $t_{ФПК}$ минимально от 2 до 11 минут, то есть это масло наиболее быстро формирует площадь контакта, но судя по рис.1, а вызывает наибольший износ.

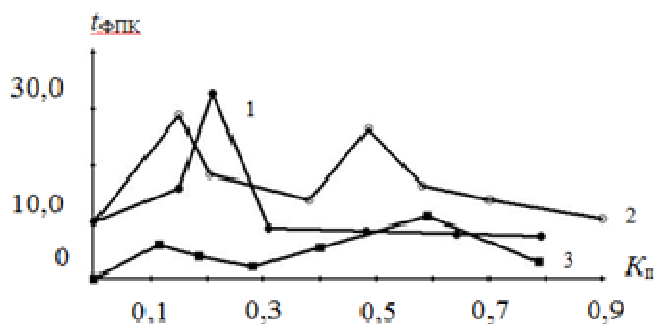


Рис.2. Зависимости времени формирования площади фрикционного контакта от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионных масел:
1 – минерального Bizol 80W-90 GL4; 2 – частично синтетического Bizol Hypoid 75W-90 GL4, GL5; 3 – синтетического Bizol Hipoid 75W-90 GL5

Для более объективной оценки смазывающих свойств окисленных трансмиссионных масел введен показатель скорости формирования площади фрикционного контакта $V_{ФПК}$, определяемой выражением

$$V_{ФПК} = U / t_{ФПК}, \text{ мм/мин.} \quad (6)$$

где U – среднеарифметическое значение диаметра пятна износа на трех шарах, мм; $t_{ФПК}$ – время формирования номинальной площади фрикционного контакта.

Согласно данным (рис. 3) установлена общая закономерность изменения скорости формирования площади фрикционного контакта, характеризующаяся циклическим её изменением: уменьшение-увеличение, причем для минерального масла (кривая 1) установлен один цикл, а для частично синтетического и синтетического масел два цикла (кривые 2 и 3). Кроме того, для минерального и частично синтетического масел скорость формирования площади фрикционного контакта находится в диапазоне от 0,03 до 0,006 мм/мин, а синтетического — от 0,03 до 0,09 мм/мин.

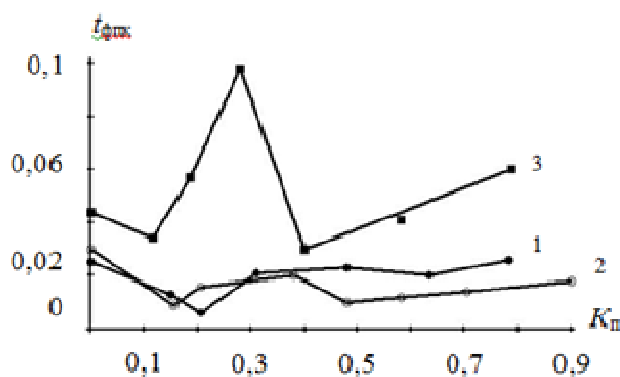


Рис.3. Зависимости скорости формирования площади фрикционного контакта от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионных масел: 1 – минерального Bizol 80W-90 GL4; 2 – частично синтетического Bizol Hypoid 75W-90 GL4, GL5; 3 – синтетического Bizol Hipoid 75W-90 GL5

Циклическое изменение скорости $V_{ФПК}$ объясняется изменением состава продуктов окисления (первичные, вторичные) и их влиянием на смазывающие свойства масел.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Испытаниями окисленных трансмиссионных масел различной базовой основы установлено, что лучшими противоизносными свойствами характеризуется минеральное масло, а синтетическое масло уступает ему почти в два раза.

2. Предложен критерий противоизносных свойств трансмиссионных масел, характеризующий условную концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта, зависимость которого от концентрации продуктов окисления описывается линейным уравнением, что позволяет сравнивать различные масла и совершенствовать систему классификации.

3. Установлено, что время и скорость формирования площади фрикционного контакта зависят от концентрации продуктов окисления, их состава и изменяются циклически.

Список литературы

1. Чичинадзе А.В. Диаграмма переходов и экранирующее действие смазочного слоя / А.В. Чичинадзе, И.А. Буяновский, Б.Э. Гурский // Трение и износ. 2002. №3. (23). С. 334-340.
2. Семенов А.П. О теории схватывания металлов / А.П. Семёнов //

Теория трения и изнашивания: сб. тр. М.: Наука, 1965. С.164-170.

3. Виноградов В.Г. Условия и виды заедания при трении закаленной стали в углеродных смазочных средах / Г.В. Виноградов, Ю.Я. Подпольский, Н.В. Карелова. Машиностроение. 1965. №5. С.109-114.

4. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий, Киев: Техника, 1970.

5. Кащеев В.Н. К вопросу об изнашивании стали в условиях интенсивного схватывания / В.Н. Кащеев // ФХММ. 1969. №4. С. 21-30.

6. Крагельский И.В. О природе заедания при сухом и граничном трении / И.В. Крагельский, Н.М. Алексеев, Л.Е. Фисун // Трение и износ, 1980. №2. С. 197-208.

7. Патент 2428677 РФ МПК GOIN 19/02 Устройство для испытания трущихся материалов и масел / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, О.Н. Петров, В.И. Тихонов. Опубл. 10.09.2011. Бюл.№ 25.

8. А.С. 1054732 СССР МПК GOIN 3156 Способ определения смазывающей способности масел / Б.И. Ковальский, Г.М. Сорокин, А.П. Ефремов, Опубл. 15.11.1983. Бюл.№ 42.

Ковальский Болеслав Иванович, д-р техн. наук, проф., Labsm@mail.ru, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа,

Янович Валерий Станиславович, соискатель, Labsm@mail.ru, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа,

Шрам Вячеслав Геннадьевич, аспирант, Labsm@mail.ru, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа

THE ANTIWEAR PROPERTIES CONTROL METHOD DURING GEAR OILS DECOMPOSITION

B.I. Kowalski, V.S. Yanovich, V.G. Shram

The results of tribological testing of gear oils of various basic framework were set out. The criterion of anti-wear properties, taking into account the concentration of the oxidation products were proposed.

Key words: wear scar diameter, the luminous flux absorption coefficient, the anti-wear properties criterion, the rate of formation of frictional contact area.

Kowalski Boleslav Ivanovic, doctor of technical sciences, Labsm@mail.ru, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University, Institute of Oil and Gas,

Yanovich Valery Stanislavovic, postgraduate, Labsm@mail.ru, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University, Institute of Oil and Gas,

Shram Vyacheslav Gennadevic, postgraduate, Shram18rus@mail.ru, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University, Institute of Oil and Gas

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОЛОЧНЫХ И ПРУТКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Г.Л. Колмогоров, М.В. Снигирева, Е.М. Аверьянова

В статье предложена методика определения оптимальных параметров волоочильного процесса при производстве биметаллических прутковых и проволоочных изделий. Методика позволяет обеспечить минимальные значения напряжения волочения и минимальные энергетические затраты при производстве биметаллических изделий.

Ключевые слова: Волочение, биметалл, угол волочения, оптимизация.

В технике широкое применение находят длинномерные биметаллические изделия, получаемые волочением. В частности, к таким изделиям относятся низкотемпературные сверхпроводники, включающие центральную часть из сверхпроводникового материала (сплавов Nb – Ti или Nb) и оболочку из чистой меди (рис. 1) [1].

В настоящее время в России создано широкомасштабное производство низкотемпературных сверхпроводящих материалов для магнитных систем. Это производство является обязательством России по участию в строительстве международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР) [2].

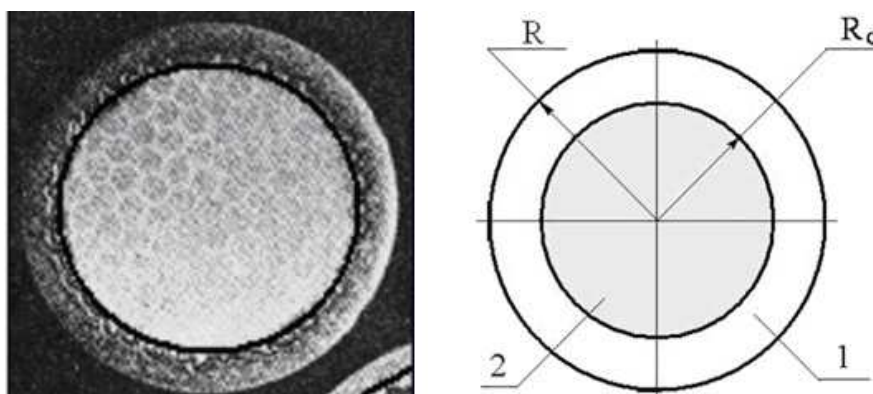


Рис. 1. Расчетная схема биметаллической заготовки:
1 – сердечник; 2 – оболочка; R – радиус проводника;
 R_c – радиус сердечника

Технология получения сверхпроводящих материалов – это много-ступенчатый процесс. Одной из важнейших операций, определяющих качество сверхпроводника, является процесс многократного волочения с промежуточными термообработками [3]. При этом актуальной задачей является использование технологического инструмента оптимальной геомет-

рии [4], обеспечивающего минимальное усилие волочения. Усилие волочения определяет величину деформации за проход и общее количество переходов многократного волочения.

Напряжение волочения для биметаллической заготовки складывается из напряжения, соответствующего пластической деформации оболочки, и напряжения, соответствующего пластической деформации сердечника

$$\sigma_{вол} = \sigma_{вол}^{об} + \sigma_{вол}^с = \frac{P_{об}}{F_{об}} + \frac{P_с}{F_с}, \quad (1)$$

где $P_{об}$ – доля усилия на деформацию оболочки, $P_с$ – доля усилия на деформацию сердечника, $F_{об}$ и $F_с$ – площадь сечения оболочки и сердечника на выходе соответственно.

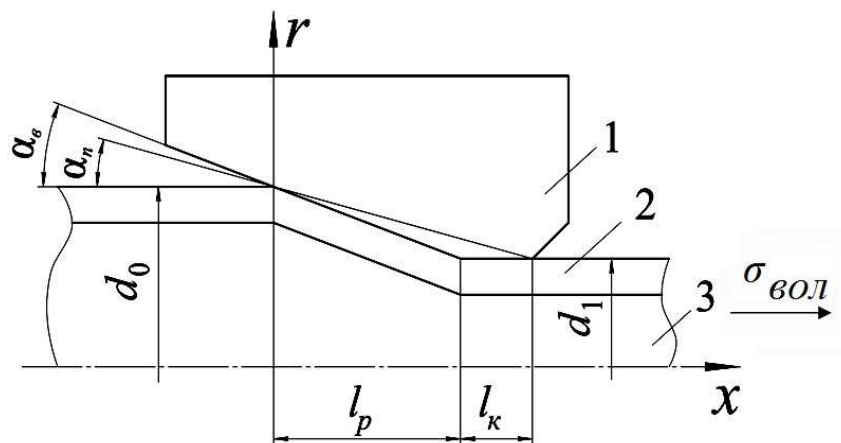


Рис. 2. Схема волочения биметаллической сверхпроводниковой заготовки: 1 – волокно, 2 – оболочка, 3 – сердечник

Пластическая деформация при волочении характеризуется коэффициентом вытяжки

$$\lambda = \frac{F_0}{F_1}, \quad (2)$$

где F_0 и F_1 – площади сечения биметаллической заготовки на входе в инструмент и выходе из него соответственно.

При волочении биметаллической заготовки полагаем, что коэффициент вытяжки для центральной части (сердечника) и наружной (оболочки) один и тот же.

Оптимизация технологического инструмента заключается в определении оптимального угла $\alpha_с$ (рис. 2), обеспечивающего минимальный расход энергии при волочении, что позволяет увеличить единичные обжатия (вытяжку) за счет снижения вероятности обрыва переднего конца заго-

товки и повысить стойкость технологического инструмента.

В настоящее время из существующих формул для определения напряжения волочения проволоки и прутков наиболее применимой является формула И.Л. Перлина [5]

$$\sigma_{вол} = \ln \lambda [\sigma_s + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_n (\sigma_s - \sigma_q)] + \sigma_q, \quad (3)$$

где σ_s – среднее по зоне деформации сопротивление деформации протягиваемой заготовки, f – коэффициент внешнего трения между инструментом и заготовкой в зоне деформации, α_n – приведенный угол конусности волочильного инструмента, σ_q – напряжение противонапряжения.

Формула (3) широко используется в инженерной практике. Однако её недостатком является то, что она не дает возможности определения оптимального значения угла конусности волочильного инструмента. Данное обстоятельство связано с тем, что множитель $\ln \lambda$ в формуле (3), характеризующий степень деформации при волочении, не учитывает дополнительные сдвиговые деформации на входе в технологический инструмент и выходе из него.

Уточнение степени деформации при деформировании в коническом технологическом инструменте выполнено в работе [6], в соответствии с которым средняя по сечению степень деформации определяется как

$$\epsilon_{cp} = \ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_\theta, \quad (4)$$

где α_θ – угол наклона образующей рабочего конуса волокна к оси волочения.

С учетом сдвиговых деформаций (4) формула (3) принимает вид

$$\sigma_{вол} = \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_\theta \right) [\sigma_s + f \operatorname{ctg} \alpha_n (\sigma_s - \sigma_q)] + \sigma_q. \quad (5)$$

Учет дополнительных сдвиговых деформаций позволяет определить оптимальные углы конусности волочильного технологического инструмента из условий минимума напряжения волочения

$$\frac{\partial \sigma_{вол}}{\partial \operatorname{tg} \alpha_\theta} = 0. \quad (6)$$

Другим недостатком формулы (3) является наличие приведенного угла волокна α_n , который рекомендуется принимать равным из условия: $\operatorname{tg} \alpha_n = 0,65 \operatorname{tg} \alpha_\theta$.

На самом деле $\operatorname{tg} \alpha_n$ может изменяться в широком диапазоне в зависимости от длины калибрующего пояска волокна. Из геометрических соотношений рис. 2 следует

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{\operatorname{tg} \alpha_\theta}{1 + \bar{l}_k}, \quad (7)$$

где $\bar{l}_k = \frac{l_k}{l_p}$ – относительная длина калибрующего пояска, l_k – длина калибрующего пояска; l_p – протяженность очага деформации.

Формула (5) с учетом соотношения (7) применена в отдельности для наружной части (оболочки) и внутренней части (сердечника) биметаллической заготовки.

Таким образом, напряжение волочения для оболочки составляет

$$\sigma_{вол}^{об} = \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_\theta \right) \left[\sigma_s^{об} + f \frac{1 + \bar{l}_k}{\operatorname{tg} \alpha_\theta} (\sigma_s^{об} - \sigma_q) \right] + \sigma_q, \quad (8)$$

где $\sigma_s^{об}$ – среднее сопротивление деформации материала оболочки.

Напряжению волочения оболочки (8) соответствует затраченное на пластическую деформацию оболочки усилие

$$P_{об} = F_{об} \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_\theta \right) \left(\sigma_s^{об} + f \frac{1 + \bar{l}_k}{\operatorname{tg} \alpha_\theta} (\sigma_s^{об} - \sigma_q) + \sigma_q \right). \quad (9)$$

Для сердечника, учитывая отсутствие проскальзывания сердечника относительно оболочки, полагаем в формуле (5) $f = 0$

$$\sigma_{вол}^c = \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_\theta \right) \sigma_s^c + \sigma_q, \quad (10)$$

где σ_s^c – сопротивление пластической деформации материала сердечника.

Напряжению волочения (10) соответствует затраченное на пластическую деформацию сердечника усилие

$$P_c = F_c \left[\left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_\theta \right) \sigma_s^c + \sigma_q \right]. \quad (11)$$

Общее усилие, затраченное на пластическую деформацию биметаллической заготовки, составит

$$P = \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_\theta \right) \cdot \left[F_c \sigma_s^c + F_{об} \sigma_s^{об} + f \frac{1 + \bar{l}_k}{\operatorname{tg} \alpha_\theta} (\sigma_s^{об} - \sigma_q) F_{об} \right] + \sigma_q (F_c + F_{об}). \quad (12)$$

Данному усилию соответствует усредненное по сечению биметаллической заготовки напряжение волочения

$$\sigma_{\text{еол}} = \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_e \right) \cdot \left[\bar{F}_{об} \sigma_s^{об} + \bar{F}_c \sigma_s^c + f \frac{1 + \bar{l}_k}{\operatorname{tg} \alpha_e} (\sigma_s^{об} - \sigma_q) \bar{F}_{об} \right] + \sigma_q (\bar{F}_c + \bar{F}_{об}) \quad (13)$$

где $\bar{F}_{об} = \frac{F_{об}}{F}$ – относительная площадь оболочки, $\bar{F}_c = \frac{F_c}{F}$ – относительная площадь сердечника, F – общая площадь сечения биметаллической заготовки.

Формула (13) позволяет определить оптимальные углы конусности волоочильного инструмента из условия минимума напряжения волочения (6).

Продифференцировав выражение (13) согласно условию (6), после преобразований и упрощений получим оптимальное значение угла конусности инструмента

$$\alpha_e^{onm} = \operatorname{arctg} \left(1,14 \sqrt{\frac{f \ln \lambda (1 + \bar{l}_k) (\sigma_s^{об} - \sigma_q) \bar{F}_{об}}{\sigma_s^{об} \bar{F}_{об} + \sigma_s^c \bar{F}_c}} \right) \quad (14)$$

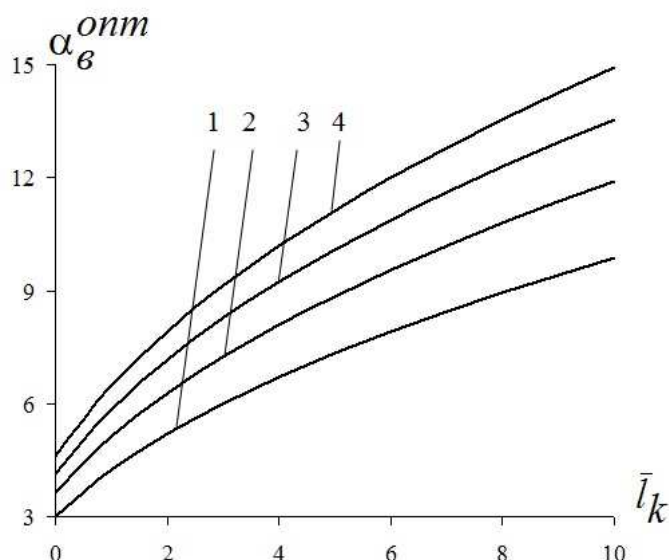
При отсутствии противонапряжения ($\sigma_q = 0$), что характерно для большинства случаев, оптимальный угол не зависит от сопротивления деформации материалов сердечника и оболочки, и определяется соотношением:

$$\alpha_e^{onm} = \operatorname{arctg} \left(1,14 \sqrt{\frac{f \sigma_s^{об} \bar{F}_{об} \ln \lambda (1 + \bar{l}_k)}{\sigma_s^{об} \bar{F}_{об} + \sigma_s^c \bar{F}_c}} \right) \quad (15)$$

На рис.3 приведены расчетные значения оптимальных углов волоочильного инструмента биметаллической заготовки. Из рис.3 следует, что с увеличением длины калибрующего пояска оптимальные углы возрастают. Увеличение вытяжки λ также приводит к увеличению оптимальных углов конусности технологического инструмента.

Геометрия волоочильного инструмента, как правило, стандартизирована, поэтому для стандартных углов могут быть рекомендованы оптимальные значения коэффициента вытяжки, обеспечивающие минимальное напряжение волочения. Разрешая соотношение (15) относительно λ , получим выражение для оптимальной вытяжки биметаллической заготовки

$$\lambda^{onm} = \exp \left[0,77 \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha_e^{onm} (\sigma_s^{об} \bar{F}_{об} + \sigma_s^c \bar{F}_c)}{(1 + \bar{l}_k) (\sigma_s^{об} - \sigma_q) \bar{F}_{об}} \right] \quad (16)$$



**Рис. 3. Зависимости оптимальных углов волочения от $\bar{l}_k$;
1 – $\lambda=1,1$; 2 – $\lambda=1,15$; 3 – $\lambda=1,2$; 4 – $\lambda=1,25$.**

Выводы.

1. В работе предложена методика определения оптимальных углов волочильного инструмента для двухкомпонентной заготовки, учитывающая наличие калибрующего пояска волокна и обеспечивающая минимальное значение напряжения волочения.
2. Показано влияние технологических параметров на величину оптимальных углов конусности технологического инструмента.
3. Для стандартных волокон с фиксированным углом конусности предложена формула для определения оптимальной вытяжки, обеспечивающей минимальные значения напряжения волочения.

Список литературы

1. Мнелян М.Г. Сверхпроводники в современном мире. М.: Просвещение, 1991. 159с.
2. Сверхпроводимость: опыт создания высокотехнологичного производства в ОАО «Чепецкий механический завод». Нанотехнологии, экология производства. 2009. №1. С.80-83.
3. Колмогоров Г.Л., Трофимов В.Н., Штуца М.Г., Чернова Т.В. Механика пластического деформирования трансверсально-изотропных композиционных сверхпроводниковых материалов. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. 217 с.
4. Трофимов В.Н., Кузнецова Т.В., Мельникова Т.Е. О профилировании канала волочильного инструмента // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2012. № 7. С. 42-45.
5. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. М.: Металлургия,

1971. 448 с.

6. Г.Л.Колмогоров, Гидродинамическая смазка при обработке металлов давлением. М.:Металлургия, 1986. 168 с.

Колмогоров Герман Леонидович, д-р техн. наук, проф., dpm@pstu.ru, Россия, Пермь, Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Снигирева Марина Викторовна, ст. преп., mvsnigireva@yandex.ru, Россия, Пермь, Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Аверьянова Елена Михайловна, магистрант, lenv92@mail.ru, Россия, Пермь, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

OPTIMIZATION OF THE PRODUCTION TECHNOLOGY BIMETALLIC WIRE AND ROD PRODUCTS

G. I. Kolmogorov, M. V. Snigireva, E.M. Averyanova

In the article the proposed method of determining the optimum parameters of drawing process in the production of bimetallic rod and wire products. The method allows to provide the minimum stress drawing and minimum energy consumption in the production of bimetallic products.

Key words: drawing; bimetal, corner of drawing, optimization.

Kolmogorov German Leonidovich, the Doctor of Technics, professor, dpm@pstu.ru, Russia, Perm, State National Research Politechnical University of Perm,

Snigireva Marina Viktorovna, the assistant professor, mvsnigireva@yandex.ru, Russia, Perm, State National Research Politechnical University of Perm,

Averyanova Elena Mihaylovna, undergraduate, lenv92@mail.ru, Perm, State National Research Politechnical University of Perm

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗИНОВЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В КАЧЕСТВЕ УПРУГОЙ СИСТЕМЫ ВИБРАЦИОННЫХ СТОЛОВ

И.А. Ильичев

Рассмотрена возможность применения резиновых пневматических элементов в качестве упругой системы вибрационных столов для формования огнеупорных изделий.

Ключевые слова: вибрационный стол, огнеупорные изделия, амплитуда и частота колебаний.

Фирма НПП «Вулкан-ТМ» совместно с Тульским государственным университетом разработала конструкцию универсального вибрационного стола с пневматическим вибровозбудителем линейного действия и с упругой системой в виде резиновых пневматических элементов [1].

На рис. 1 показан один из резиновых пневматических элементов, установленных на вибрационном столе. Всего их устанавливают четыре по углам рабочей плиты. Данные элементы выполняют функции упругой системы и кинематически связывают рабочий орган с основанием.

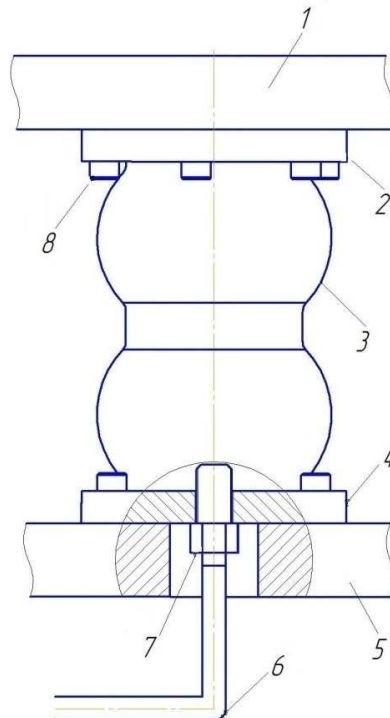


Рис. 1. Резиновый пневматический элемент:
1 – плита (рабочий орган); 2, 4 – фланцы; 3 – резиновый сильфон;
5 – плита основания; 6 – шланг; 7 – штуцер; 8 – болт

С целью теоритического обоснования работы вибрационного стола, является построение математической модели упругого элемента.

Одним из важнейших вопросов построения математической модели вибрационного стола с резиновыми пневматическими элементами является установление закона, связывающего осадку резинового пневматического элемента с силой, приложенным к нему. Если будет установлено, что этот закон линейный, то моделирование значительно упрощается. Установить этот факт можно из эксперимента по осадке резинового пневматического элемента с различными контролируемыми скоростями. Обеспечить этот эксперимент можно путем использования стандартных испытательных машин в режиме сжатия.

Наиболее подходящей для таких испытаний является машина с кинематическим приводом [2], которая позволяет поддерживать постоянную скорость перемещения подвижной траверсы и изменять ее при переходе к новому испытанию. Такой является испытательная машина Instron 5289 (рис. 2).

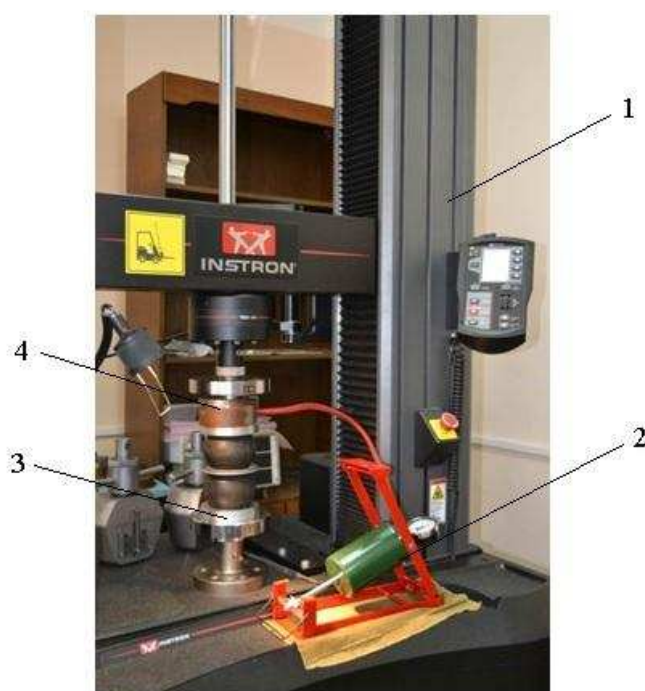


Рис. 2. Определение жесткости резинового пневматического упругого элемента на испытательной машине Instron 5289:

**1 – испытательная машина; 2 – воздушный насос с манометром;
3 – резиновый пневматический элемент; 4 – разрезное кольцо**

Для проведения испытаний на сжатие резинового пневматического элемента было изготовлено приспособление 4 в виде разрезного кольца Ø110 высотой 50 мм толщиной 10 мм с разрезом шириной 15 мм, что обеспечивало подключение автомобильного насоса с манометром. Приспособление позволяет получить и контролировать заданное давление в

резиновом пневматическом упругом элементе без удаления его из рабочей зоны испытательной машины.

Испытания проводились в соответствии со следующей программой табл. 1.

Таблица 1

Программа статических испытаний

Начальное давление, МПа	Скорость осадки, мм/мин						
0,1	30	45	60	75	90	105	120
0,2	30	45	60	75	90	105	120
0,3	30	45	60	75	90	105	120
0,4	30	45	60	75	90	105	120

Программа реализовывалась следующим образом:

1. В математическом обеспечении BlueHill3 испытательной машины для каждого начального давления создавалась отдельная выборка (таблица результатов) из 7 элементов, каждый из которых соответствовал одному значению скорости.

2. В резиновом пневматическом элементе создавалось начальное давление в соответствии с табл. 1.

3. Для элемента выборки устанавливалась скорость осадки в соответствии с табл. 1.

4. Запускалась испытательная машина.

5. По достижении осадки 15...17 мм испытательная машина останавливалась.

6. Испытание для следующего элемента выборки начиналось с п.3; начальное давление при необходимости корректировалось.

7. По исчерпанию диапазона скоростей табл.1 создавалась новая выборка (п.1).

Визуальная оценка диаграмм полученных с испытательной машины показывает, что при одном значении начального давления в исследованном диапазоне скоростей зависимость "сила – осадка" практически линейна и не зависит от скорости осадки. Секущие значения жесткости приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты экспериментальных исследований жесткости
резинового пневматического упругого элемента**

Начальное давление, МПа	Перемещение Δ , м	Сила F , Н	Жесткость C , Н/м
0,2	0,017	500	$2,943 \cdot 10^4$
0,3	0,018	695	$3,861 \cdot 10^4$
0,4	0,016	830	$5,188 \cdot 10^4$

В таблице указаны координаты точки диаграммы, по которой оце-

нивается жесткость, и значение жесткости резинового пневматического упругого элемента

$$C = \frac{F}{\Delta}.$$

Далее диаграммы были обработаны методом наименьших квадратов по полиномиальной зависимости

$$F = \sum_{k=n_0}^N C_k \Delta^k$$

при значениях $n_0=0;1$ (полиномы общего вида и полиномы без свободного члена). Наивысшая степень полинома N полагалась равной 1, 2, 3.

Для каждого полинома вычислялось относительное среднеквадратическое отклонение

$$S = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M \left[\frac{F_k - \tilde{F}(\Delta_k)}{F_k} \right]^2}, \quad (1)$$

где M – количество элементов выборки (т.е. количество точек диаграммы, использованных при обработке).

Величину S (1) можно интерпретировать как несмещенную оценку среднеквадратического отклонения относительного остатка

$$r_k = F_k - \tilde{F}(\Delta_k), \quad k=1..M,$$

который, по свойствам МНК – оценок, принадлежит нормальной генеральной совокупности с математическим ожиданием нуль и неизвестной дисперсией, которая оценивается как S^2 . Критерий выбора степени аппроксимации может быть сформулирован в виде

$$T = \frac{s_{(m)}^2}{s_{(m+1)}^2} \leq \frac{1}{M-m} [M-m-1 + F_{\alpha}(1, M-m-1)], \quad (2)$$

где $F_{\alpha}(1, M-m-1)$ – α – квантиль распределения Фишера с $M-m-1$ степенью свободы; m – порядок (степень) аппроксимации, принятый за основной.

При выборе модели резинового пневматического упругого элемента следует выбирать полином без свободного члена, так как по определению при отсутствии осадки усилие резинового пневматического элемента отсутствует. Удовлетворительное качество аппроксимации полным полиномом объясняется тем, что при подкачке резинового пневматического элемента и фиксированном положении траверсы испытательной машины небольшое превышение начального давления приводит к начальному поджатию, которое при запуске программы испытания из BlueHill3 обнуляется в программе, а на самом деле присутствует.

Так как по критерию (2) ни одна из линейных моделей полинома

без свободного члена не является значимой (левая часть неравенства (2) $T_{кр} \approx 1.1$), то выбор таковой основывается на удобстве ее при моделировании и очевидной близости опытных данных.

Оценки жесткости при различных давлениях и их дисперсии, равные отношению остаточной суммы квадратов к разности между количеством элементов выборки и степенью аппроксимации [3], приведены в табл. 3.

Таблица 3

Оценки жесткости при разных давлениях и их дисперсии

Начальное давление, МПа	Оценка жесткости, Н/м	Дисперсия, (Н/м) ²	Коэффициент вариации
0,2	$3,507 \cdot 10^4$	2,508	$4,596 \cdot 10^{-5}$
0,3	$4,338 \cdot 10^4$	14,245	$8,701 \cdot 10^{-5}$
0,4	$5,646 \cdot 10^4$	12,153	$6,174 \cdot 10^{-5}$

Аппроксимация зависимости жесткости от давления полными полиномами дает зависимости:

$$C_{\text{лин}}(p) = 1,288 \cdot 10^4 + 1,07 \cdot 10^5 p;$$

$$C_{\text{квадр}}(p) = 3,281 \cdot 10^4 - 3,651 \cdot 10^4 p + 2,391 \cdot 10^5 p^2$$

Аппроксимированные данные представлены на рис. 3.

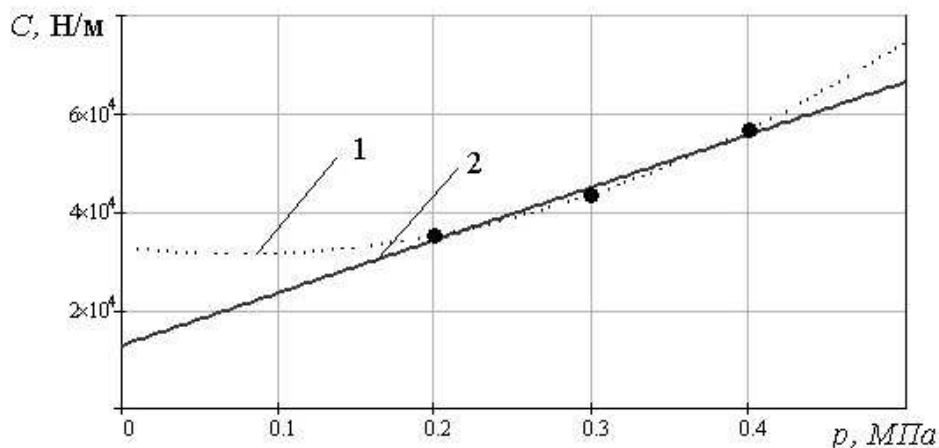


Рис.3. Аппроксимация зависимости жесткости резинового пневматического элемента от начального давления:

- – экспериментальные данные; 1 – квадратичная аппроксимация;
- 2 – линейная аппроксимация

Таким образом, проведенные исследования показали, что жесткость резиновых пневматических упругих элементов имеет линейный характер, и они могут быть использованы в качестве упругих элементов вибрационных столов.

Список литературы

1. Ильичев И.А., Золотухин В.И., Варьяш Г.М. Виброформование огнеупорных изделий. // Изв. ТулГУ. Технические науки.
2. Ключев В.В. Испытательная техника. / Справочник в 2-х т. Т.1. М.: Машиностроение, 1982. 528 с.
3. Королук В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф.. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. М.: Наука, 1985. 640с.

Ильичев Илья Андреевич, аспирант, tulailichev@mail.ru, Россия, Тульский государственный университет

USED OF RUBBER AIR SPRINGS AS AN ELASTIC SYSTEM VIBRATING TABLE

I.A. Ilyichev

The design of the vibrating table with pneumatic linear acting vibroexciter and an elastic system as a pneumatic rubber elastic suspension is considered. The research results of its efficiency are leaded.

Key words: vibrating table, refractories, the amplitude and frequency of oscillation.

Ilyichev Iliya Andreevich, postgraduate, tulailichev@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.892.1

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ

Б.И. Ковальский, В.С. Янович, В.Г. Шрам, О.Н. Петров

Приведены результаты испытания трансмиссионных масел различной базовой основы на термоокислительную стабильность. Установлен коэффициент интенсивности процессов самоорганизации, протекающих в смазочном масле при окислении. Предложен критерий термоокислительной стабильности.

Ключевые слова: коэффициент поглощения светового потока, относительная вязкость, испаряемость, скорость процессов окисления и испарения, критерий термоокислительной стабильности, процессы самоорганизации, явление перераспределения тепловой энергии.

Влияние базовой основы на ресурс трансмиссионных масел не достаточно изучено, более того единой нормативно-технической документа-

ции на базовые масла не существует [1]. В Российской Федерации базовые масла выпускаются по внутривзаводским стандартам или техническим условиям.

Общие требования к трансмиссионным маслам определяются конструктивными особенностями, назначением и условиями эксплуатации агрегатов трансмиссии. Данные масла работают в режимах высоких скоростей скольжения, давлений и широком температурном диапазоне. Их пусковые свойства и длительная работоспособность должны обеспечиваться в интервале температур от минус 60 °С до плюс 150 °С. Важнейшими свойствами трансмиссионных масел являются смазывающая способность, вязкость, термоокислительная стабильность, антикоррозионные и защитные свойства, стойкость к пенообразованию.

Согласно ГОСТа 17479.2-85 масла классифицируются по классам вязкости (9,12,18,34, сСт) и группам эксплуатационных свойств ТМ1-ТМ5, определяемых контактными напряжениями и температурой масла в объеме.

В работе рассмотрено влияние базовой основы на термоокислительную стабильность трансмиссионных масел, что позволяет определить их соответствие группам эксплуатационных свойств.

Для исследования выбраны трансмиссионные масла различной базовой основы: минеральное Bizol 80W-90GL4, частично синтетическое Bizol Hypoid 75W-90 GL4, GL5 и синтетическое Bizol Hypoid 75W-90GL5. В качестве средств испытания применялся прибор для термостатирования масел с перемешиванием с частой вращения мешалки 300 об/мин при температуре 150 °С, которая поддерживалась автоматически с точностью ± 2 °С. В качестве средств измерения применялись: фотометрическое устройство для прямого фотометрирования окисленных масел при толщине фотометрируемого слоя 2 мм; малообъемный вискозиметр (9Г); электронные весы, для измерения массы испарившегося масла [2].

Методика заключалась в следующем проба масла массой $100 \pm 0,1$ граммов заливалась в термостойкий стеклянный стакан и термостатировалась при температуре 150 °С в течении 8-ми часов с перемешиванием. После каждых 8-ми часов испытания стакан с окисленным маслом взвешивался для определения массы испарившегося масла, отбирались пробы для фотометрирования и измерения вязкости, после чего отработанные пробы сливались в стакан, который повторно взвешивался. Степень окисления масла оценивалась по коэффициенту поглощения светового потока K_n . Испытания продолжались до достижения коэффициента K_n значений равных 0,75 – 0,8 ед. Термоокислительная стабильность оценивалась по коэффициенту K_n , относительной вязкости K_μ , определяемый отношением вязкости окисленного масла к вязкости товарного, и испаряемости G . По данным показателям производилось сравнение исследуемых масел и обоснование критерия термоокислительной стабильности.

На рис.1 представлены зависимости коэффициента поглощения светового потока K_n от времени испытания трансмиссионных масел различной базовой основы. Для минерального (кривая 1) и частично синтетического (кривая 2) масел зависимости описываются кусочно-линейными функциями и имеют изгиб, что указывает на образование при окислении двух видов продуктов различной оптической плотностью. Время образования вторичных продуктов определяется продлением участка зависимости $K_n = f(t)$ после точки изгиба до пересечения с осью абсцисс. Для минерального масла время составило 18 часов, а частично синтетического 8 часов. Кроме того, для минерального масла существует период времени 6 часов, при котором процессы окисления практически не протекают. В этой связи можно предположить, что исходным материалам для образования вторичных продуктов окисления являются первичные продукты.

Представленные зависимости $K_n = f(t)$ для каждого из участков описываются уравнениями:

$$K_n = a(t-t_n), \quad (1)$$

где a – коэффициент, характеризующий скорость процесса окисления 1/ч; t – время окисления; t_n – время начала образования вторичных продуктов окисления, ч.

Регрессивные уравнения для линейных участков минерального и частично синтетического масел имеют вид:

минерального

$$\text{1-й участок } K_n = 0,0095(t-5) \quad (2)$$

$$\text{2-й участок } K_n = 0,0226(t-18) \quad (3)$$

частично синтетического

$$\text{1-й участок } K_n = 0,0094t \quad (4)$$

$$\text{2-й участок } K_n = 0,015(t-8) \quad (5)$$

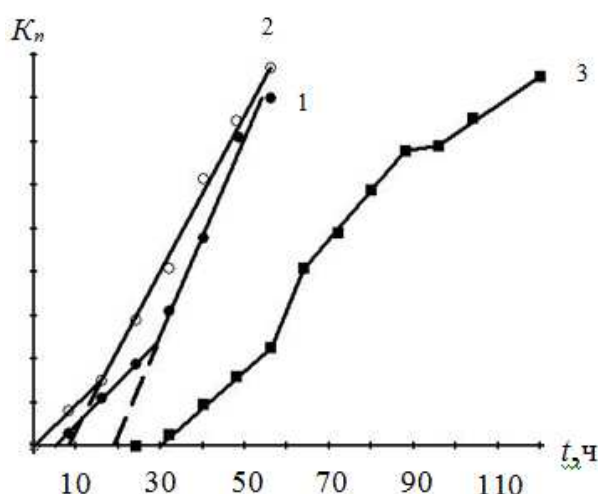


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения светового потока K_n от времени окисления трансмиссионных масел: 1 - минеральное Bizol 80W-90GL4; 2 - частично синтетическое Bizol Hypoid 75W-90 GL4; 3 - GLS и синтетическое Bizol Hypoid 75W-90GL5

Для синтетического масла (кривая 3) зависимость $K_n = f(t)$ имеет три линейных участка, а процесс окисления начинается после 29 часов испытания, то есть данное масло имеет область сопротивления. Линейное увеличения коэффициента K_n установлено в периоды времени от 29 до 56 часов, от 64 до 88 часов и от 96 до 120 часов. При переходе от одного участка к другому наблюдается либо резкое увеличение коэффициента K_n , либо его стабилизация.

Согласно данным рис. 1 наивысшая термоокислительная стабильность по коэффициенту K_n установлена для синтетического масла, а наименьшая для частично синтетического, хотя оно относится к группам эксплуатационных свойств GL4 и GL5, но уступает минеральному маслу, которое относится к группе GL4. Это указывает на несовершенство системы классификации.

Потенциальный ресурс для данных масел определялся временем достижения коэффициентом K_n значения равного 0,8 ед и составил для синтетического масла 112 часов, а для минерального и частично синтетического в два раза меньше (рис 2).

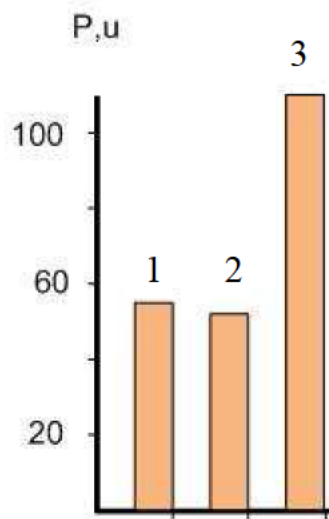


Рис. 2. Гистограмма потенциального ресурса трансмиссионных масел при окислении: 1 - минеральное *Bizol 80W-90GL4*; 2 - частично синтетическое *Bizol Hypoid 75W-90 GL4, GL5*; 3 - синтетическое *Bizol Hypoid 75W-90GL5*

Испаряемость трансмиссионных масел (рис 3) наименьшая устанавливается для минерального масла кривая 1, а наибольшая для частично синтетического. Причем испаряемость сильно различается за первые 8 часов испытания и составила для: минерального масла 1,8 г; частично синтетического – 5,2 г и синтетического - 3,9 г. Это может объясняться наличием легких фракций и воды, кроме того температура испытания 150 °С для частично синтетического и минерального масел является высокой.

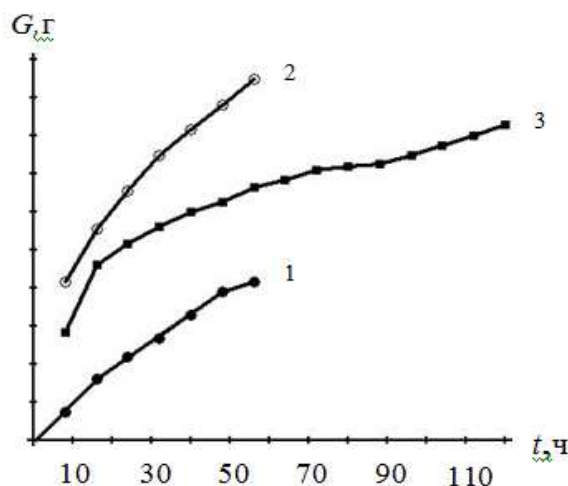


Рис. 3. Зависимости испаряемости от времени окисления трансмиссионных масел: 1- минерального Bizol 80W-90GL4; 2 - частично синтетического Bizol Hypoid 75W-90 GL4, GL5; 3 - синтетического Bizol Hypoid 75W-90GL5

Вязкость трансмиссионных масел при окислении оценивалась коэффициентом относительной вязкости K_μ , определяемым отношением:

$$K_\mu = M_{\text{ок}} / M_{\text{тов}}, \quad (6)$$

где $M_{\text{ок}}$ и $M_{\text{тов}}$ - соответственно кинематическая вязкость окисленного и товарного масел, сСт

Это позволило сравнивать масла по изменению вязкости масел при их окислении. Установлено (рис. 4), что наиболее стабильным изменением вязкости характеризуется минеральное масло (кривая 1), а наибольшее изменение вязкости установлено для частично синтетического масла (кривая 2).

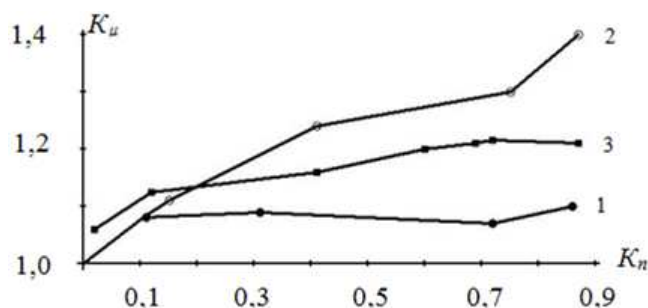


Рис. 4. Зависимости коэффициента относительной вязкости от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионных масел: 1- минерального Bizol 80W-90GL4; 2 - частично синтетического Bizol Hypoid 75W-90 GL4, GL5; 3 - синтетического Bizol Hypoid 75W-90GL5

Так, при коэффициенте поглощения светового потока равного 0,8 ед. вязкость увеличилась для масел: минерального на 10%, частично синтетического на 35% и синтетического на 22%.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что продукты окисления оказывают большее влияние на вязкость частично синтетического и синтетического масел.

В результате термостатирования трансмиссионных масел установлено, что основное влияние температура оказывает на изменения оптических свойств и испаряемость, поэтому в качестве критерия термоокислительной стабильности E_{moc} предложена сумма [3]

$$E_{moc} = K_n + K_G, \quad (7)$$

где K_n – коэффициент поглощения светового потока; K_G – коэффициент испаряемости.

$$K_G = m/M, \quad (8)$$

где m и M – соответственно масса испарившегося масла за определенное время и масса пробы после испытания за тоже время.

Данный критерий характеризует количество поглощенной тепловой энергии продуктами окисления и испарения. Зависимости данного критерия от времени испытания (рис. 5) для минерального и частично синтетического масел имеют изгиб, указывающий на образование двух видов продуктов окисления различной оптической плотностью. Для синтетического масла зависимость представляет ломаную линию, что также подтверждает наличие продуктов окисления с различной оптической плотностью.

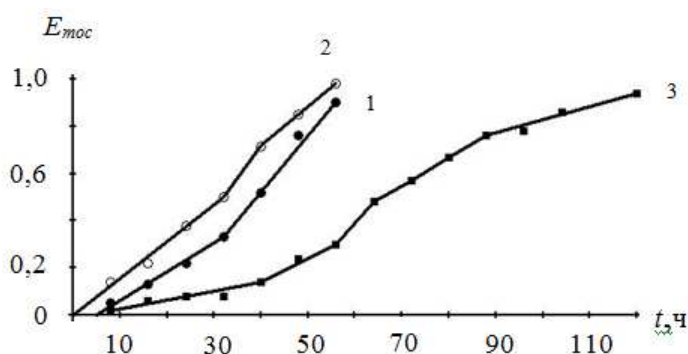


Рис. 5. Зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от времени окисления трансмиссионных масел: 1 - минеральное Bizol 80W-90GL4, 2 - частично синтетическое Bizol Hypoid 75W-90 GL4, GL5; 3 - синтетическое Bizol Hypoid 75W-90GL5

В этой связи происходит явление перераспределения тепловой энергии между продуктами окисления различной энергоемкостью и летучестью, вызывающее процессы самоорганизации, то есть избыточная тепловая энергия поглощается этими продуктами. Это явление вызывает изменение скорости окисления и испарения (рис. 6).

Согласно данным (рис. 6а) приращение скорости окисления для всех исследованных масел подвержено колебанию, что подтверждает наличие

явления перераспределения тепловой энергии между продуктами окисления различной оптической плотности и испарением. Кроме того, для минерального и частично синтетического масел процессы окисления протекают с большей скоростью (кривые 1 и 2), чем для синтетического масла (кривая 3).

Однако для синтетического масла можно отметить три характерных участка изменения приращения скорости окисления. На первом участке приращение скорости окисления сохраняет тенденцию увеличения, а на втором участке происходит его уменьшение до нуля. Третий участок характеризуется повторным увеличением приращения скорости окисления. Такие колебания приращения скорости окисления объясняются тем, что для образования вторичных продуктов с большей оптической плотностью необходима определенная концентрация первичных продуктов. В момент когда их концентрация достигла определенного значения начинают образовываться вторичные продукты, которые увеличивают приращение скорости окисления. После того, как концентрация первичных продуктов уменьшилась до определенного значения наступает период их образования, а вторичные продукты при этом не образуются, поэтому приращение скорости окисления начинает уменьшаться. Этот процесс протекает циклично и поэтому вызывает колебания скорости окисления.

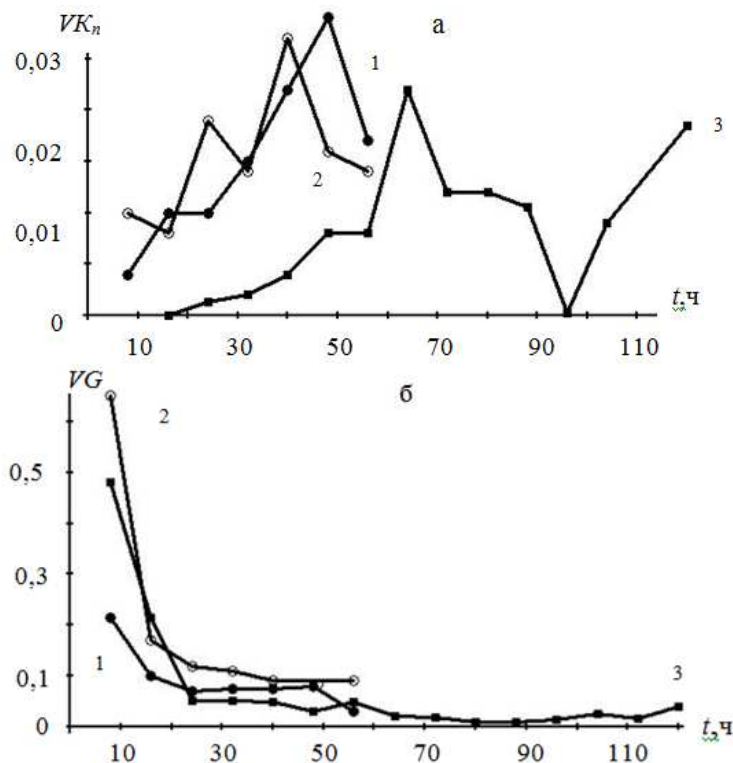


Рис. 6. Зависимости приращения скорости окисления (а) и испарения (б) от времени окисления трансмиссионных масел: 1 - минеральное Bizol 80W-90GL4; 2 - частично синтетическое Bizol Hypoid 75W-90 GL4, GL5; 3 – синтетическое Bizol Hypoid 75W-90GL5

Приращение скорости испарения (рис. 6б) приобретает максимальное значение в первые часы испытания, а затем уменьшается. Максимальное приращение скорости испарения для масел составило: минерального – $0,22 \text{ г/ч}$; частично синтетического – $0,65 \text{ г/ч}$ и синтетического – $0,48 \text{ г/ч}$, а минимальное значение: для минерального – $0,025 \text{ г/ч}$; частично синтетического – $0,09 \text{ г/ч}$ и синтетического – $0,01 \text{ г/ч}$.

Сравнивая зависимости приращений скоростей окисления и испарения видно, что в определенное время их скорости на отдельных участках находятся либо в противофазе либо в фазе.

Это подтверждает наличие явления перераспределения тепловой энергии и процессов самоорганизации, протекающих в смазочном материале.

Для оценки интенсивности процессов самоорганизации предложен коэффициент K_c , определяемый отношением

$$K_c = dVK_n/dV_G, \quad (9)$$

где dVK_n и dV_G соответственно приращения скоростей окисления и испарения за определенный период времени испытания.

Согласно данным (Рис.7) коэффициент интенсивности процессов самоорганизации для минерального масла (кривая 1) сохраняет тенденцию увеличения за весь период испытания, то есть процессы окисления преобладают над процессами испарения.

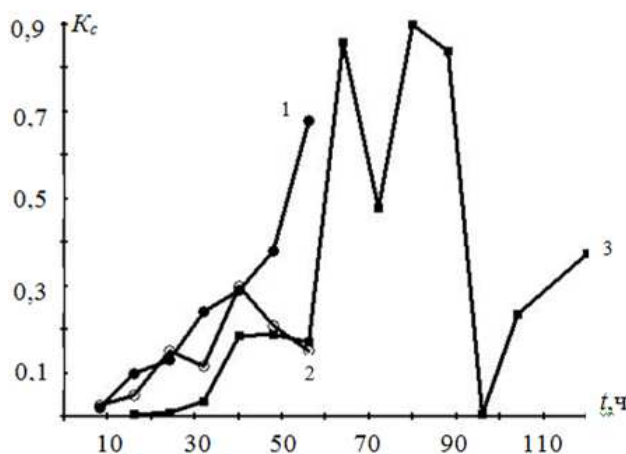


Рис. 7. Зависимости коэффициента интенсивности процессов самоорганизации от времени их окисления: 1 - минеральное Bizol 80W-90GL4; 2 - частично синтетическое Bizol Hypoid 75W-90 GL4, GL5; 3 - синтетическое Bizol Hypoid 75W-90GL5

Для частично синтетического масла (кривая 2) за периоды времени от 24 до 32 часов и от 40 до 56 часов процессы испарения замедляют процессы окисления. Для синтетического масла (кривая 3) за период времени испытания 40 часов процессы окисления ускоряются, но протекают с меньшей интенсивностью по сравнению с маслами 1 и 2. Однако после 56 часов испытания наблюдается резкое увеличение коэффициента K_c , за счет

увеличения скорости окисления, а за период времени от 64 часов до 96 часов наблюдаются большие колебания коэффициента K_c за счет снижения скорости испарения и колебания скорости окисления.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Предложенный оптический метод контроля термоокислительной стабильности позволяет получить дополнительную информацию по изменению оптических свойств, вязкости и летучести масел, используемой для совершенствования системы их классификации и идентификации.

2. Установлено, что механизм окисления масел характеризуется последовательным образованием первичных продуктов которые доокисляясь переходят во вторичные с большей оптической плотностью, причем переход происходит при определенной концентрации первичных продуктов, что вызывает перераспределение тепловой энергии между ними и изменение скорости окисления, а также объясняет процессы самоорганизации, протекающие в смазочном материале не зависимо от его базовой основы.

3. Предложенный критерий термоокислительной стабильности характеризует количество поглощенной тепловой энергии продуктами окисления и испарения и рекомендуется для сравнения различных масел с целью выбора более термостойких в зависимости от степени нагруженности техники, а также совершенствования системы классификации по группам эксплуатационных свойств.

4. Критерий интенсивности процессов самоорганизации, протекающих в смазочном материале раскрывает механизм окисления и перераспределения тепловой энергии, поглощенной продуктами окисления и испарения.

Список литературы

1. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справ./ Н.Г. Анисимов (и др.): под редакцией В.М. Школьников.-2е изд., перераб. и доп. М.: Издат. центр «Техинформ», 1999. 596с.

2. Ковальский Б.И. Термоокислительная стабильность трансмиссионных масел/ Б.И. Ковальский, Ю.Н. безбородов, Л.А. Фельдман, Н.Н. Малышева. Монография Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. 150с.

3. Патент 2219530 МПК GOIN 25/00 Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов/ Б.И. Ковальский, С.И. Васильев, Е.Ю. Янаев. Оpubл. 20.12.2003 бюл. №35.

Ковальский Болеслав Иванович, д-р техн. наук, проф., Labsm@mail.ru, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа,

Янович Валерий Станиславович, соискатель, Labsm@mail.ru, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа,

Шрам Вячеслав Геннадьевич, аспирант, Shram18rus@mail.ru, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа,

Петров Олег Николаевич, ст. преподаватель, petrov_oleq@mail.ru, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа

THE OPTICAL METHOD OF GEAR OILS THERMAL OXIDATIVE STABILITIES MONITORING

B.I. Kowalski, V.S. Yanovich, V.G. Shram, O.N. Petrov

The results of the tests of gear oils of various basic framework for thermo-oxidative stability were proposed. The coefficient of intensity of processes of self-organization during the lubricant oil oxidation was determined. The criterion of thermal oxidative stability was proposed.

Key words: the luminous flux absorption coefficient, the relative viscosity, evaporation rate, the rate of oxidation and evaporation, thermal oxidative stability criterion, the processes of self-organization, the phenomenon of redistribution of heat energy.

Kowalski Boleslav Ivanovich, doctor of technical sciences, Labsm@mail.ru, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University, Institute of Oil and Gas,

Yanovich Valery Stanislavovich, postgraduate, Labsm@mail.ru, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University, Institute of Oil and Gas,

Shram Vyacheslav Gennadevich, postgraduate, Shram18rus@mail.ru, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University, Institute of Oil and Gas

Petrov Oleg Nikolaevich, Senior Teacher, petrov_oleq@mail.ru, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University, Institute of Oil and Gas

УДК 539.384.6

СВЯЗАННЫЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ШАРНИРНО ОПЁРТОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ РАЗНОСОПРОТИВЛЯЮЩЕГОСЯ МАТЕРИАЛА

М.Ю. Делягин, А.А.Трещёв

Рассмотрена задача расчета пологих сферических оболочек из материалов, свойства которых зависят от вида напряженного состояния, на сочетание механической и температурной нагрузок при конечных прогибах. Оценено влияние разнсопротивляемости, связанности и геометрической нелинейности на напряженно-деформированное состояние шарнирно опертой сферической оболочки из конструкционного графита АРВ.

Ключевые слова: разнсопротивляемость, геометрическая нелинейность, связанность, термоупругость, оболочка.

Создание высокоэффективных конструкционных материалов требует развития научной базы для обоснованного применения их в различных отраслях промышленности. Использование классических теорий механики деформируемого твердого тела не позволяет обеспечить должную безо-

пасность конструкций, так как у большинства новых материалов проявляется зависимость механических и температурных свойств от вида реализуемого в точке напряженного состояния. Для описания эффекта разнотемпературности воспользуемся методикой нормированных пространств напряжений [1, 2]. Дополнительно учтем температурные эффекты деформирования, возникающие вследствие связанности полей напряжений и температур, что особенно важно для конструкций энергетической отрасли, а также геометрическую нелинейность, которая свойственна тонкостенным оболочкам.

Уравнения состояния изотропного разнотемпературного материала, находящегося в температурном поле, получим в пространстве главных напряжений, применив операции дифференцирования к термодинамическому потенциалу Гиббса [1], в форме $e_k = -\partial\Gamma / \partial\sigma_k$ и $L = \partial\Gamma / \partial T$. Переходя к цилиндрической системе координат и используя статическую гипотезу Кирхгофа-Лява, принимаем $\sigma_z = 0$, тогда, с учетом осесимметричного нагружения получим:

$$\begin{aligned} e_r &= A\sigma_r + C\sigma_\phi + A_t\theta^\circ + B\alpha_r\sigma_r + D(\alpha_r + \alpha_\phi)\sigma_\phi + \\ &+ (0,5B - D)\left[(1 - \alpha_r^2)\sigma_r - \alpha_\phi^2\sigma_\phi\right]\alpha_r + B_t\alpha_r\theta^\circ; \\ e_\phi &= A\sigma_\phi + C\sigma_r + A_t\theta^\circ + B\alpha_\phi\sigma_\phi + D(\alpha_\phi + \alpha_r)\sigma_r + \\ &+ (0,5B - D)\left[(1 - \alpha_\phi^2)\sigma_\phi - \alpha_r^2\sigma_r\right]\alpha_\phi + B_t\alpha_\phi\theta^\circ; \\ L &= (A_t + B_t\alpha_r)\sigma_r + (A_t + B_t\alpha_\phi)\sigma_\phi + C\sigma\theta^\circ / T_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где e_r, e_ϕ – радиальные и окружные деформации, σ_r, σ_ϕ – радиальные и окружные напряжения, A, B, C, D, A_t, B_t – константы потенциала [1, 2],

$$\begin{aligned} A &= 0,5\left(\frac{1}{E^+} + \frac{1}{E^-}\right), \quad B = 0,5\left(\frac{1}{E^+} - \frac{1}{E^-}\right), \quad C = -0,5\left(\frac{\nu^+}{E^+} + \frac{\nu^-}{E^-}\right), \\ D &= -0,5\left(\frac{\nu^+}{E^+} - \frac{\nu^-}{E^-}\right), \quad A_t = 0,5(\alpha_{t1}^+ + \alpha_{t1}^-), \quad B_t = 0,5(\alpha_{t1}^+ - \alpha_{t1}^-), \quad E^+, E^-, \nu^+, \end{aligned}$$

$\nu^-, \alpha_{t1}^+, \alpha_{t1}^-$ – модули упругости, коэффициенты Пуассона и коэффициенты линейного теплового расширения материала при одноосном растяжении (+) и одноосном сжатии (-) соответственно; $\alpha_r = \sigma_r / S$, $\alpha_\phi = \sigma_\phi / S$ – нормированные напряжения, $S = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\phi^2}$ – норма пространства напряжений или модуль вектора полного напряжения, L – плотность энтропии, $\theta^\circ = T - T_0$ – величина изменения температуры, T – текущая температура в точке оболочки, T_0 – начальная температура оболочки.

При конечных прогибах и зависимости свойств материала от вида напряженного состояния задача о деформировании пологой сферической оболочки постоянной кривизны становится и геометрически, и физически нелинейной, поэтому решение будем искать в приращениях функций. Линеаризацию проводим на начальном этапе построения разрешающей системы уравнений согласно методу последовательных нагружений В.В. Петрова [3].

Приращения деформаций $\delta e_r, \delta e_\phi$ выразим через приращения напряжений $\delta \sigma_r, \delta \sigma_\phi$ и изменений температур $\delta \theta^\circ$ с учетом уравнений (1):

$$\delta e_r = \Delta_{11} \delta \sigma_r + \Delta_{12} \delta \sigma_\phi + \Delta_{13} \delta \theta^\circ; \quad \delta e_\phi = \Delta_{21} \delta \sigma_r + \Delta_{22} \delta \sigma_\phi + \Delta_{23} \delta \theta^\circ; \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta_{11} &= \frac{\partial e_r}{\partial \sigma_r} = A + B(\alpha_r^3 + 2\alpha_r \alpha_\phi^2) + D\alpha_\phi^3 - D\alpha_r \alpha_\phi^2 + \\ &+ (0,5B - D)[\alpha_r^3 + 2\alpha_r \alpha_\phi^2 - \alpha_r^5 - \alpha_\phi^5 - 4\alpha_r^3 \alpha_\phi^2 + 2\alpha_r^2 \alpha_\phi^3] + B_t \theta^\circ \alpha_\phi / S; \\ \Delta_{12} = \Delta_{21} &= \frac{\partial e_r}{\partial \sigma_\phi} = \frac{\partial e_\phi}{\partial \sigma_r} = C - B\alpha_r^2 \alpha_\phi + D(2\alpha_r \alpha_\phi + \alpha_r^3 + \alpha_\phi^3) + \\ &+ (0,5B - D)[- \alpha_\phi \alpha_r^2 + 3\alpha_r^4 \alpha_\phi - 3\alpha_r^3 \alpha_\phi^2] - B_t \theta^\circ \alpha_r \alpha_\phi / S. \\ \Delta_{13} &= \frac{\partial e_r}{\partial \theta^\circ} = A_t + B_t \alpha_r; \quad \Delta_{22} = \frac{\partial e_\phi}{\partial \sigma_\phi} = A + B(\alpha_\phi^3 + 2\alpha_r^2 \alpha_\phi) + D\alpha_r^3 - \\ &- D\alpha_r^2 \alpha_\phi + (0,5B - D)[\alpha_\phi^3 + 2\alpha_\phi \alpha_r^2 - \alpha_\phi^5 - \alpha_r^5 - 4\alpha_r^2 \alpha_\phi^3 + 2\alpha_r^3 \alpha_\phi^2] + \\ &+ B_t \theta^\circ \alpha_r / S; \quad \Delta_{23} = \frac{\partial e_\phi}{\partial \theta^\circ} = A_t + B_t \alpha_\phi. \end{aligned}$$

Выразим из уравнений (2) приращения главных напряжений:

$$\begin{aligned} \delta \sigma_r &= B_{11} \delta e_r + B_{12} \delta e_\phi + B_{13} \delta \theta^\circ; \\ \delta \sigma_\phi &= B_{21} \delta e_r + B_{22} \delta e_\phi + B_{23} \delta \theta^\circ, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} B_{11} &= \Delta_{22} / \Delta; \quad B_{12} = -\Delta_{21} / \Delta; \quad B_{21} = -\Delta_{12} / \Delta; \quad B_{22} = \Delta_{11} / \Delta; \\ B_{13} &= (\Delta_{13} \Delta_{21} - \Delta_{23} \Delta_{11}) / \Delta; \quad B_{23} = (\Delta_{23} \Delta_{12} - \Delta_{13} \Delta_{22}) / \Delta; \\ \Delta &= \Delta_{11} \Delta_{22} - \Delta_{12} \Delta_{21}. \end{aligned}$$

Компоненты тензора деформаций представим в рамках формализма Т. Кармана [4]:

$$e_r = u_{,r} - kw + 0.5w_{,r}^2 - zw_{,rr}; \quad e_\phi = \frac{u}{r} - kw - \frac{z}{r} w_{,r}, \quad (4)$$

где u, w – радиальные перемещения и прогибы срединной поверхности, k – кривизна оболочки, r – радиальная координата, z – вертикальная ко-

ордината, отсчитываемая от срединной поверхности оболочки.

Пренебрегая малыми высшего порядка, получим выражения для приращений деформаций:

$$\begin{aligned}\delta e_r &= (\delta u)_{,r} - k\delta w + w_{,r}(\delta w)_{,r} - z(\delta w)_{,rr}; \\ \delta e_\phi &= \frac{\delta u}{r} - k\delta w - \frac{z}{r}(\delta w)_{,r}.\end{aligned}\quad (5)$$

Определим приращения усилий:

$$\begin{aligned}\delta N_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_r dz; \quad \delta N_\phi = \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_\phi dz; \\ \delta M_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_r z dz; \quad \delta M_\phi = \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_\phi z dz.\end{aligned}\quad (6)$$

Уравнения равновесия для сферической оболочки под воздействием равномерно распределенной нагрузки с учетом геометрической нелинейности имеют вид:

$$\begin{aligned}M_{r,rr} - M_{\phi,r}/r + 2M_{r,r}/r + k(N_r + N_\phi) + N_r w_{,rr} &= -q; \\ N_{r,r} + (N_r - N_\phi)/r - k[M_{r,r} + (M_r - M_\phi)/r] &= 0.\end{aligned}\quad (7)$$

Пренебрегая малыми высшего порядка, получим линеаризованные уравнения:

$$\begin{aligned}(\delta M_r)_{,rr} - (\delta M_\phi)_{,r}/r + 2(\delta M_r)_{,r}/r + \\ + k(\delta N_r + \delta N_\phi) + (\delta N_r)w_{,rr} + N_r(\delta w)_{,rr} &= -\delta q; \\ (\delta N_r)_{,r} + (\delta N_r - \delta N_\phi)/r - k[(\delta M_r)_{,r} + (\delta M_r - \delta M_\phi)/r] &= 0.\end{aligned}\quad (8)$$

Уравнение притока тепла определим, подставляя выражение для плотности энтропии разнсопротивляющегося материала в уравнение теплопроводности Фурье:

$$\lambda \theta_{,zz}^\circ - \rho C_\sigma \theta_{,t}^\circ - \left(A_t(\sigma_r + \sigma_\phi)_{,t} + B_t(S)_{,t} \right) T_0 + U = 0, \quad (9)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, C_σ – теплоемкость материала при постоянном напряжении, U – удельная мощность источников тепла.

Уравнение теплопроводности в приращениях примет вид:

$$\begin{aligned}\lambda(\delta \theta^\circ)_{,zz} - \rho C_\sigma(\delta \theta^\circ)_{,t} - \\ - \left[A_t(\delta \sigma_r + \delta \sigma_\phi)_{,t} + B_t\left(\alpha_r(\delta \sigma_r)_{,t} + \alpha_\phi(\delta \sigma_\phi)_{,t} \right) \right] T_0 + U &= 0.\end{aligned}\quad (10)$$

Два уравнения равновесия и уравнение теплопроводности должны решаться совместно для учета связанности полей напряжений и температур. Подставляя в уравнения (8) и (10) зависимости (3), (5), (6) получим систему линеаризованных дифференциальных уравнений в частных произ-

водных относительно приращений прогибов, радиальных перемещений и изменений температур:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{11}(\delta w)_{,rrrr} + K_{11}(\delta w)_{,rrr} + K_{12}(\delta w)_{,rr} + K_{13}(\delta w)_{,r} + \\ + K_{14}(\delta w) + J_{14}(\delta u)_{,rrr} + K_{15}(\delta u)_{,rr} + K_{16}(\delta u)_{,r} + K_{17}(\delta u) = \delta q - K_{q1}; \\ K_{21}(\delta w)_{,rrr} + K_{22}(\delta w)_{,rr} + K_{23}(\delta w)_{,r} + K_{24}(\delta w) + \\ + K_{25}(\delta u)_{,rr} + K_{26}(\delta u)_{,r} + K_{27}(\delta u) = -K_{q2}; \\ \lambda \cdot (\delta \theta^\circ)_{,zz} + K_{31} \cdot (\delta \theta^\circ)_{,t} + K_{32} \cdot (\delta u)_{,rt} + K_{33} \cdot (\delta w)_{,t} + K_{34} \cdot (\delta w)_{,rt} + \\ + K_{35} \cdot (\delta w)_{,rrt} + K_{36} \cdot (\delta u)_{,t} + U + K_{37} \cdot (\delta u)_{,r} + \\ + K_{38} \cdot (\delta u) + K_{39} \cdot (\delta w)_{,rr} + K_{310} \cdot (\delta w) + K_{311} \cdot (\delta w)_{,r} + K_{312} \cdot (\delta \theta^\circ) = 0, \end{array} \right.$$

где J_{ij} , K_{ij} - функции накопленного к рассматриваемому моменту нагружения напряженного состояния.

Разрешающую систему линейных дифференциальных уравнений необходимо дополнить граничными и начальными условиями в приращениях. Граничные условия для шарнирного опирания по контуру запишутся следующим образом:

$$\delta w = 0; \delta M_r = \int_{-h/2}^{h/2} (B_{11}\delta e_r + B_{12}\delta e_\phi + B_{13}\delta \theta^\circ) z dz = 0; \delta u = 0.$$

Для центра оболочки:

$$(\delta w)_{,r} = 0; \delta u = 0.$$

Температурные начальные условия в приращениях примут вид:

$$\delta \theta^\circ(z = h/2) = 0; \delta \theta^\circ(z = -h/2) = 0.$$

С помощью метода конечных разностей перейдем к системе линейных алгебраических уравнений. Решать систему будем дважды на каждом этапе нагружения согласно двухшаговому методу последовательного возмущения параметров В.В. Петрова [5]. Это позволит многократно сократить погрешность линеаризации методом последовательных нагружений и уменьшить требуемое количество шагов по нагрузке и затраты машинного времени. Для полного учета эффекта разнотвердости на первом этапе необходимо дополнительно решить задачу о малых прогибах оболочки итерационным методом упругих решений А.А. Ильюшина [6]. Алгоритм программы был реализован в среде MATLAB.

С помощью разработанной программы была рассчитана шарнирно опертая пологая сферическая оболочка радиусом в плане $b = 1$ м со стрелой подъема 0.08 м и толщиной 0.04 м из конструкционного графита АРВ с характеристиками: $E^+ = 0.375$ ГПа, $E^- = 0.613$ ГПа, $\nu^+ = 0.2$, $\nu^- = 0.35$,

$\alpha_{t1}^+ = 4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{t1}^- = 6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Максимальная поперечная нагрузка была ограничена величиной 195 кПа. Начальная температура оболочки 300 К. На верхней поверхности температура понижалась до 285 К, а на нижней повышалась до 325 К.

Чтобы количественно оценить различные эффекты, учитываемые в расчете, задача рассматривалась в четырех различных постановках. Первый вариант постановки задачи – геометрически нелинейный расчет с учетом разнсопротивляемости и связанности. Этот вариант принимался за базисный и на всех рисунках условно обозначался «СРС». Для оценки энергетических эффектов деформирования рассматривалась несвязанная задача термоупругости разнсопротивляющегося материала, а результаты решения несвязанной задачи на графиках обозначаются «НРС». Результаты решения связанной задачи без учета разнсопротивляемости с осредненными термомеханическими характеристиками из опытов на одноосное растяжение и одноосное сжатие на рисунках обозначены «ОСР». Такая модель позволит вычислить влияние разнсопротивляемости на напряженно-деформированное состояние оболочки. Для выявления поправок в распределениях усилий вследствие конечных деформаций рассматривается геометрически линейная связанная задача термоупругости оболочки с учетом зависимости свойств материала от вида реализуемого в точке напряженного состояния. На графиках такая постановка задачи обозначается «ЛИН».

На рис. 1 показаны прогибы оболочки. Наибольшее влияние на величину прогиба оказывает учет разнсопротивляемости. Отличие от решения с осредненными характеристиками составило 54 %. Наименее значительно в рассматриваемой задаче проявляется эффект связанности. Расхождение между связанным и несвязанным решением не превышает 5 %. Поправка для величины максимального прогиба за счет геометрической нелинейности составила 25 %.

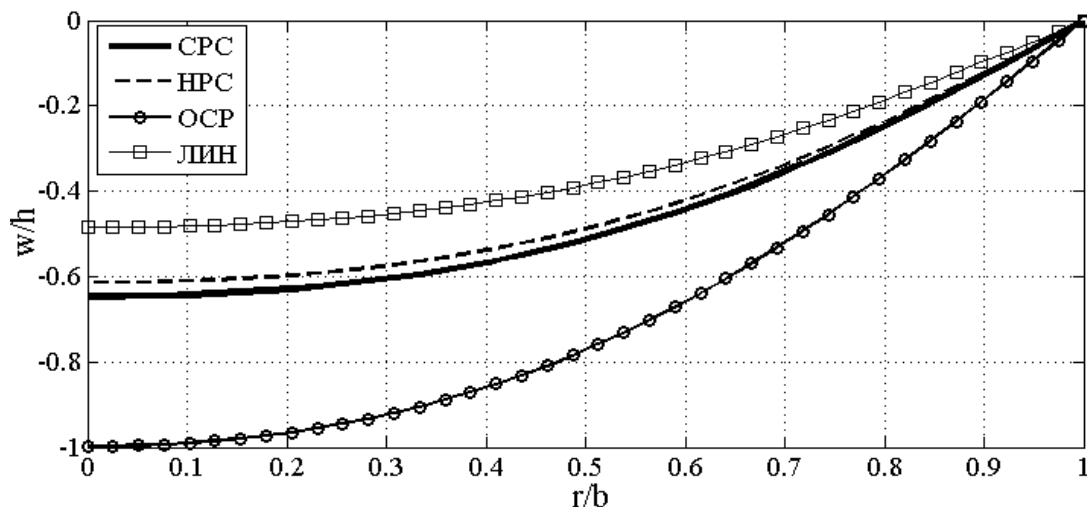


Рис. 1. Прогибы оболочки

На рис. 2 показаны радиальные перемещения срединной поверхности оболочки. Влияние разносопротивляемости усиливается и достигает 82%. Проявление эффекта связанности так же как и для прогибов не превосходит 5%. Поправка для величины максимального прогиба за счет геометрической нелинейности составила 25 %.

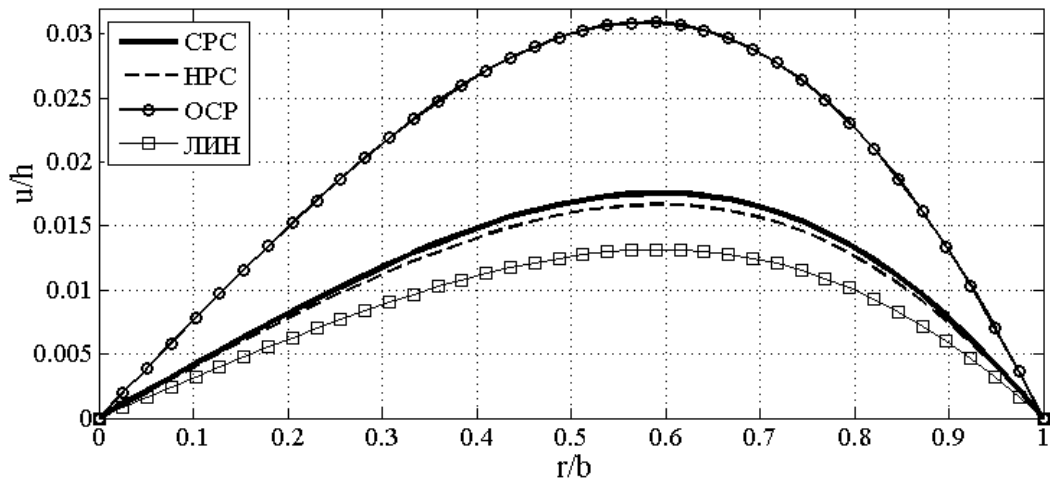


Рис. 2. Радиальные перемещения

На рис. 3 представлено распределение радиальных напряжений на верхней и нижней поверхностях оболочки вдоль радиуса. Поправки в радиальные напряжения за счет учета зависимости свойств материала от вида напряженного состояния достигают на верхней поверхности 22 %, на нижней – 12 %. Расхождения между геометрически линейным расчетом и расчетом по нелинейной теории типа Т. Кармана для величины напряжений не превосходят 20 %. Влияние связанности проявляется незначительно. Расхождение между несвязанной и связанной постановками задачи в величине радиальных напряжений составляет 5 %.

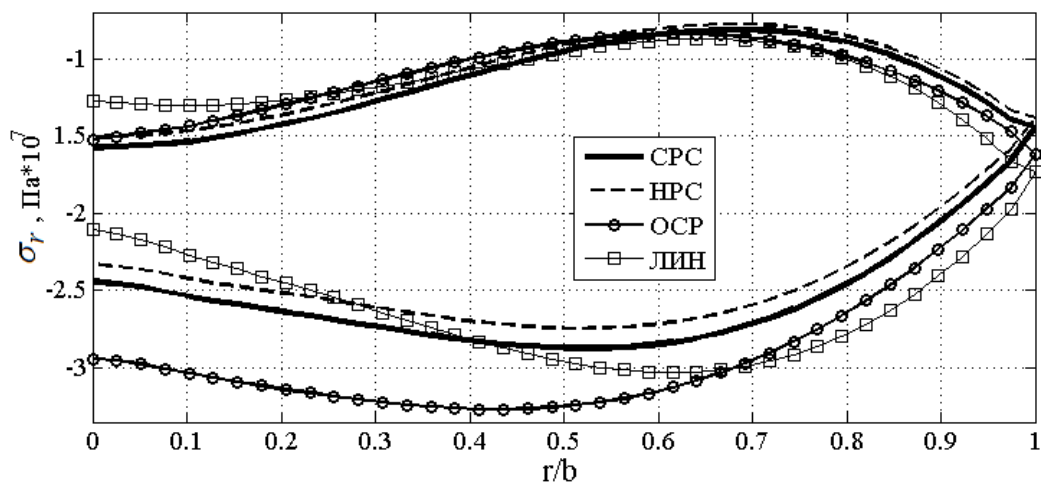


Рис. 3. Радиальные напряжения

На рис. 4 показано распределение окружных напряжений на верхней и нижней поверхностях оболочки вдоль радиуса. Поправки для окружных напряжений за счет разнсопротивляемости достигают 23%. Расхождение между геометрически линейным и нелинейным расчетами для величин окружных напряжений достигает 25 %. Учет связанности полей напряжений и температур вносит поправки до 5 % в распределение окружных напряжений.

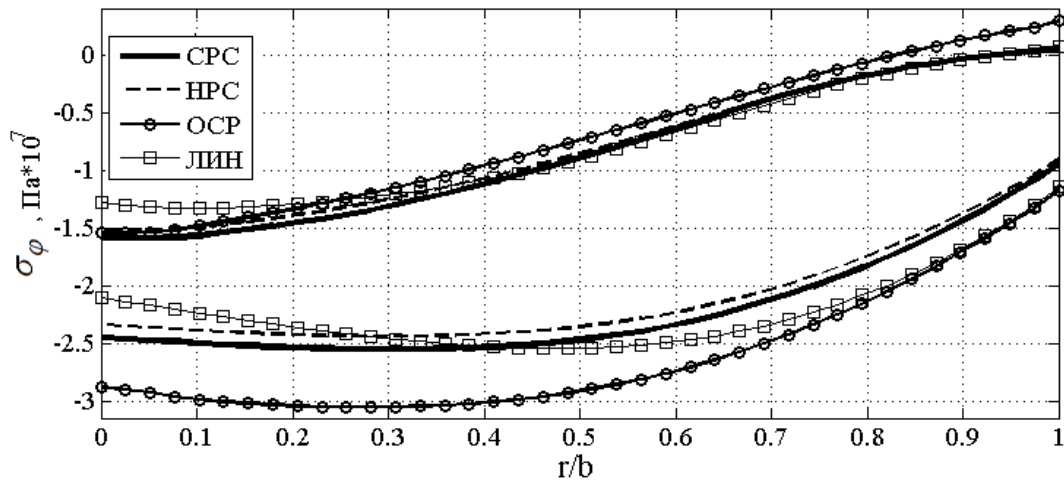


Рис. 4. Окружные напряжения

Задачи термоупругости конструкций из разнсопротивляющихся материалов уже не раз привлекали внимание исследователей. В работе [7] рассматриваются прямоугольные пластины при малых прогибах при связанном термомеханическом нагружении. Несвязанные задачи термоупругости анизотропных разнсопротивляющихся материалов рассмотрены в работах [8, 9] на примере кольцевых пластин различной толщины. НДС сферических оболочек при жестком опирании исследовано в работе [10].

В результате всех вышеперечисленных работ были выявлены значительные эффекты, вызванные разнсопротивляемостью материала исследуемой конструкции. Фактором, в наибольшей степени определяющим несущую способность сферической оболочки, являются радиальные напряжения. Поправки в радиальные напряжения при шарнирном опирании составили 22 %, а при жестком защемлении они достигали 56 % [10]. На основании этих фактов можно сделать вывод, что количественные проявления рассматриваемого эффекта усиливаются при более сложных видах напряженного состояния.

Список литературы

1. Матченко Н.М., Трещев А.А. Теория деформирования разнсопротивляющихся материалов. Прикладные задачи теории упругости. М.: Тула: РААСН; ТулГУ, 2004. 211 с.

2. Трещев А.А. Теория деформирования и прочности материалов, чувствительных к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения. М.: Тула; РААСН; ТулГУ, 2008. 264 с.
3. Karman Th. Festigkeitsprobleme in Maschinenbau. Enzyklopadie der Mathematischen Wissenschaften. Bd IV. Mechanik, Teilband 4, Hft 3, Art 27, Punkt 8. Ebene Platten. Leipzig: B. G. Teubner, 1910. S. 311-385.
4. Петров В.В., Кривошеин И.В. Методы расчета конструкций из нелинейно деформируемого материала // Учеб. пособие. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. 208 с.
5. Петров В. В., Овчинников И.Г., Ярославский В.И. Расчет пластин и оболочек из нелинейно-упругого материала. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1976. 136 с.
6. Ильюшин А.А. Пластичность. Часть 1. Упруго-пластические деформации. М. Л.: ОГИЗ, 1948. 376 с.
7. Чигинский Д.С., Трещёв А.А., Теличко В.Г. Связанная задача термомеханического изгиба тонких прямоугольных пластин из изотропных разносопротивляющихся материалов // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 2. Проблемы специального машиностроения. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 494-502.
8. Самсоненко Г.И., Трещёв А.А. Термоупругий изгиб кольцевых пластин средней толщины из ортотропных разносопротивляющихся материалов // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 1. С. 238-245.
9. Самсоненко Г.И. Изгиб прямоугольных тонких пластин из анизотропных разносопротивляющихся материалов при термомеханическом нагружении // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 1. С. 231-238.
10. Трещёв, А.А. Решение связанной задачи термоупругости для сферической оболочки из разносопротивляющегося материала с учетом геометрической нелинейности / А.А. Трещёв, М.Ю. Делягин // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я.Яковлева. Серия Механика предельного состояния. Чебоксары: Чув-ГПУ. 2012. №3(13). С. 18-26.

Делягин Михаил Юрьевич, аспирант, m.delyagin@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Трещёв Александр Анатольевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, taa58@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

COUPLED THERMOMECHANICAL CALCULATION OF SIMPLY SUPPORTED
SPHERICAL SHELL MADE OF DIFFERENTLY RESISTANTE MATERIAL

M.YU. Delyagin, A.A. Treschev

The combined mechanical and thermal calculation of shallow spherical shells made of materials which properties depend on the type of stress has been considered with finite displacement. The effect of different resistance, connectedness and geometric nonlinearity on the stress-strain state of simply supported spherical shell made of constructional graphite APB has been estimated.

Key words: different resistant, geometric nonlinearity, connectedness, thermoelasticity, shell.

Delyagin Miknail Yurievich, postgraduate, m.delyagin@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Treschev Alexander Anatolievich, doctor of technical science, professor, the head of department, taa58@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University.

УДК 539.3.

НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МАТЕРИАЛА ШПИНДЕЛЯ ЗАТВОРА ТРУБОПРОВОДА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

С.П. Судаков, И.В. Лопа, А.И. Ефимова

Моделируется распространение продольных волн нормальных напряжений в шпинделе затвора трубопровода из упруго – вязкопластического материала при динамическом нагружении в результате гидравлического удара. Показано, что решение задачи чувствительно к изменению скорости деформации, не только количественно, но и качественно зависит от материала шпинделя и отражение переднего фронта волны от его торцев значительно изменяет напряженно – деформированное состояние материала.

Ключевые слова: продольные волны, шпиндель затвора, гидравлический удар, фронт волны, отражение, напряженно – деформированное состояние.

При определенной совокупности граничных условий в материале шпинделя затвора трубопровода генерируются и распространяются продольные волны нормальных напряжений. Например, при ударных нагрузках в результате быстрого перекрытия перемещаемого в трубопроводе потока необходимо учитывать волновой характер нагружения и определять соответствующее напряженно – деформированное состояние материала шпинделя [1]. Решение задачи строится в рамках гипотезы плоских сечений, что сводит процесс деформирования к распространению в материале шпинделя одномерных продольных волн, и напряженно-деформированное состояние полностью описывается напряжением σ и

деформацией $\mathcal{E}$, являющимися функциями только координаты z и времени t . Система уравнений, описывающая задачу, включает уравнение движения, условие неразрывности и определяющее соотношение:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma(z, t)}{\partial z} = \rho \frac{\partial v(z, t)}{\partial t} \\ \frac{\partial v(z, t)}{\partial z} = \frac{\partial \mathcal{E}(z, t)}{\partial t} \\ E(\mathcal{E}^p, T) \frac{\partial \mathcal{E}(z, t)}{\partial z} = \frac{\partial \sigma(z, t)}{\partial t} + E(\mathcal{E}^p, T) \Phi(\sigma, \mathcal{E}) \end{cases}, \quad (1)$$

где ρ - плотность материала шпинделя; $V(z, t)$ - скорость частиц шпинделя в сечении z в момент времени t ; $\Phi(\sigma, \mathcal{E})$ - функция, аппроксимирующая свойства материала шпинделя.

В начальный момент времени материал шпинделя ненапряжен, недеформирован и неподвижен: $\sigma(z, 0) = \mathcal{E}(z, 0) = v(z, 0) = 0$. Граничные условия описываются функцией: $\sigma(0, t) = F(t)$, где $F(t)$ - наперед заданная функция.

Уравнения (1), начальные и граничные условия образуют полную и замкнутую систему уравнений относительно напряжений, деформаций и скорости частиц, однозначно и полностью описывающую напряженно-деформированное состояние материала шпинделя и распространение в нем падающих плоских продольных волн напряжений для любой точки до момента времени, соответствующего приходу в нее отраженной от свободного торца волны растяжения.

На рис. 1 изображена фазовая плоскость zot , зона I которой соответствует зоне распространения падающей волны напряжений сжатия. Прямая АВ является характеристическим направлением, вдоль которого распространяется фронт отраженной волны растяжения (причем он распространяется в предварительно неоднородно напряженном и деформированном материале) и одновременно принадлежит зоне II, напряженно-деформированное состояние в которой определяется интерференцией волн растяжения и сжатия. Напряжение на фронте отраженной волны разгружает сжатый материал по мере распространения фронта отраженной волны к нагружаемому торцу, и в случае, если амплитуда растягивающих напряжений больше, чем напряжение сжатия в падающей волне, происходит нагружение материала напряжением обратного знака.

Таким образом, особенностью зоны II являются в общем случае ненулевые начальные условия. Для получения решения в зоне II использовалась система (1) с начальными условиями, заданными вдоль прямой АВ, характеристики напряженно-деформированного состояния шпинделя вдоль которой определялись из решения в зоне I. При этом суммар-

ное состояние на переднем фронте отраженной волны записывались так:

$$X_{II}^{\Sigma}\left(Z, \frac{2L-Z}{a}\right) = X_{II}^P\left(Z, \frac{2L-Z}{a}\right) + X_I^C\left(Z, \frac{2L-Z}{a}\right), \quad (2)$$

где X_{II}^{Σ} - суммарное значение искомых величин на фронте отраженной волны в результате ее взаимодействия с падающей волной; X_{II}^P - амплитудное значение искомой величины, привносимое в рассматриваемую точку передним фронтом отраженной волны; X_I^C - соответствующий параметр состояния в рассматриваемой точке шпинделя до прихода в нее фронта отраженной волны; L - длина шпинделя; $a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ - скорость звука в материале шпинделя.

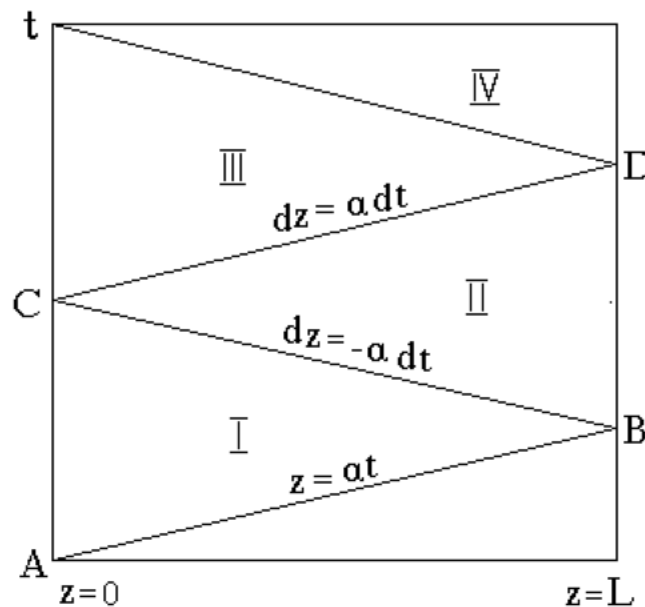


Рис. 1. Фазовая плоскость zot

В качестве граничного условия для зоны II принималось равенство напряжения на свободном торце шпинделя $z = L$ нулю. Аналогичные рассуждения проводились и для последующих зон фазовой плоскости, причем решение в зоне IV эквивалентно решению в зоне II, а в зоне V совпадает с решением в зоне III и т.д.

Система (1) представляет собой систему квазилинейных дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка гиперболического типа и, поэтому, ее целесообразно решать методом характеристик [2]. Дополним ее тождественными соотношениями для полных дифференциалов искомых функций:

$$\left. \begin{aligned} d\sigma(z, t) &= \frac{\partial \sigma(z, t)}{\partial z} dz + \frac{\partial \sigma(z, t)}{\partial t} dt \\ d\mathcal{E}(z, t) &= \frac{\partial \mathcal{E}(z, t)}{\partial z} dz + \frac{\partial \mathcal{E}(z, t)}{\partial t} dt \\ dV(z, t) &= \frac{\partial V(z, t)}{\partial z} dz + \frac{\partial V(z, t)}{\partial t} dt \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

В результате получили систему шести линейных алгебраических уравнений (1) и (3) с неизвестными функциями: $\frac{\partial \sigma}{\partial z}$, $\frac{\partial \sigma}{\partial t}$, $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial z}$, $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t}$, $\frac{\partial V}{\partial z}$, $\frac{\partial V}{\partial t}$. Потребуем, чтобы она имела бесконечное множество решений.

Для этого необходимо, чтобы ее главный определитель равнялся нулю. Из этого условия получили три семейства уравнений характеристик: $dz=0$, $dz = \pm a dt$. Чтобы решение вдоль характеристик было конечным необходимо рассмотреть равенство нулю других определителей системы. Для этого заменим последний столбец главного определителя соответствующими правыми частями уравнений (1), (3) и рассмотрим его равенство нулю. Последовательно подставляя в полученное равенство уравнения характеристик, построим дифференциальные соотношения между искомыми функциями $\sigma(z, t)$, $\mathcal{E}(z, t)$ и $V(z, t)$:

вдоль характеристик $dz = 0$:

$$d\sigma(z, t) - E d\mathcal{E}(z, t) + E \Phi(\sigma, \mathcal{E}) dt = 0, \quad (4)$$

вдоль характеристик $dz = a dt$:

$$d\sigma(z, t) - a \rho dV(z, t) + E \Phi(\sigma, \mathcal{E}) dt = 0, \quad (5)$$

вдоль характеристик $dz = -a dt$:

$$d\sigma(z, t) + a \rho dV(z, t) + E \Phi(\sigma, \mathcal{E}) dt = 0, \quad (6)$$

Таким образом, интегрирование квазилинейной системы дифференциальных уравнений гиперболического типа (1) при заданных начальных и граничных условиях сводится к интегрированию соотношений (4) - (6) вдоль соответствующих характеристических направлений.

Решение проводилось численно с использованием модифицированного метода Массо в основе которого лежит комбинация замены дифференциальных уравнений, связывающих искомые функции вдоль характеристических направлений, соответствующими конечно-разностными уравнениями и организации цикла итераций на каждом шаге численного интегрирования. Предполагается использование для решения жестко закрепленной в плоскости zot сетки, линии которой параллельны координатным осям фазовой плоскости. Такая расчетная схема позволяет строить решение последовательно в трех областях фазовой плоскости: на фронте падающей волны напряжений, на границе и во внутренней области, лежащей между границей и фронтом волны. Кроме того, она позволяет с ис-

пользованием (2) унифицировать расчет как для области распространения падающей волны, так и для области распространения отраженной волны напряжений.

При численных расчетах использовались два вида аппроксимирующей функции $\Phi(\sigma, \epsilon)$:

$$\text{линейная } \Phi(\sigma, \epsilon) = \frac{\sigma - f(\epsilon) - M(\epsilon)}{N(\epsilon)};$$

$$\text{степенная } \Phi(\sigma, \epsilon) = \left[\frac{\sigma - f(\epsilon)}{\beta(\epsilon)} \right]^{\alpha(\epsilon)}.$$

Анализировался материал шпинделя сталь 3. Обработка экспериментальных данных [2] для стали 3 методом наименьших квадратов привела к следующим аппроксимирующим зависимостям, входящих в структуру определяющих уравнений:

$$f(\epsilon) = 241 + 2196\epsilon \quad [\text{МПа}], \quad M(\epsilon) = 266 - 103\epsilon \quad [\text{МПа}], \\ N(\epsilon) = 0.193 + 0.17\epsilon \quad [\text{МПа} \cdot \text{с}], \quad \beta(\epsilon) = 98.1 - 232\epsilon, \quad \alpha(\epsilon) = 5 - 7\epsilon.$$

Результаты расчетов представлены на рис. 2 - 5.

Рисунок 2 иллюстрирует распределение скорости частиц в материале шпинделя при $\sigma(0, t) = 320$ МПа, $L = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м в различные фиксированные моменты времени: кривая 1 - при $t = 3 \cdot 10^{-6}$ с, кривая 2 - при $t = 6 \cdot 10^{-6}$ с, кривая 3 - при $t = 9 \cdot 10^{-6}$ с, кривая 4 - при $t = 12 \cdot 10^{-6}$ с. Выбранный интервал времен соответствует времени прохождения фронтом волны всей длины шпинделя. Видно, что после прохождения падающей волны сжатия скорость частиц распределена по длине шпинделя крайне неравномерно и быстро убывает по мере удаления от нагружаемой поверхности. Последующие отражения волн от обеих поверхностей шпинделя приводят к перераспределению скорости по длине, причем существует устойчивая тенденция к выравниванию значений скорости.

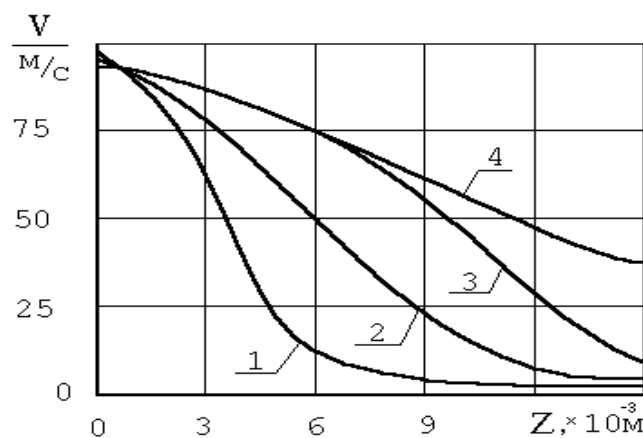


Рис. 2. Распределение скорости частиц материала шпинделя в фиксированные моменты времени

На рис. 3 изображены моментные снимки профилей волн напряжений при тех же условиях. Видно, что выводы, сделанные для распределения скорости по длине шпинделя, справедливы и для распределения напряжения. Однако, в отличие от скорости, падение напряжения на поверхности $z=0$ весьма существенно.

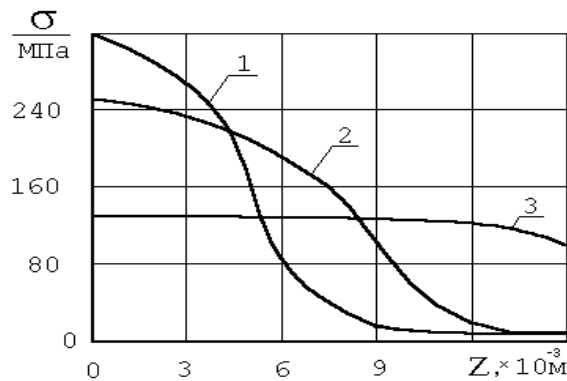


Рис. 3. Моментные снимки профилей волн напряжений в различные моменты времени

На рис. 4 представлено распределение скорости частиц при рассмотренных ранее исходных данных в момент времени $t = 3 \cdot 10^{-6}$ с для различных ударных давлений, при которых скорости движения граничной поверхности: кривая 1 при $V_0=150$ м/с, кривая 2 - $V_0=100$ м/с, кривая 3 - $V_0=50$ м/с. Видно, что влияние ударного потока существенно вблизи нагружаемой поверхности. По мере удаления от нее разница быстро уменьшается. К тому же, уменьшение скорости граничной поверхности при больших ударных давлениях происходит быстрее, что можно объяснить повышением сопротивляемости материала при увеличении динамичности воздействия. Говоря другими словами, налицо влияние скорости деформации на напряженно - деформированное состояние.

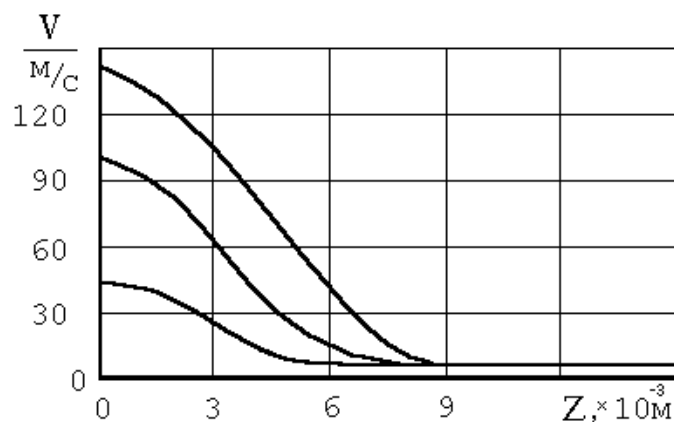


Рис. 4. Распределение скорости частиц материала шпинделя при различных ударных давлениях в фиксированные моменты времени

Таким образом, показано, что решение задачи чувствительно к изменению скорости деформации, не только количественно, но и качественно зависит от материала шпинделя и отражение переднего фронта волны от торцев шпинделя значительно изменяет напряженно – деформированное состояние материала.

Список литературы

1. Лопа И.В., Патрикова Т.С., Ефимова А.И. Поперечный изгиб винта с учетом изменения момента инерции по его длине.// Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 2. Проблемы специального машиностроения. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 241-245.

2. Баранов В.Л., Лопа И.В., Чивиков З.Ч., Симеонов П.С. Устойчивость ударно нагруженных стержней. Тула: ТулГУ. 1997. 128 с.

Судаков Сергей Павлович, канд. техн. наук, доц., pmdm@tsu.tula.ru Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Лопа Игорь Васильевич, д-р техн. наук, проф., pmdm@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ефимова Анна Игоревна, асп., pmdm@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

STRESS - STRAIN STATE OF THE MATERIAL SPINDLE SHUTTER PIPELINE UNDER DYNAMIC LOADING

S.P. Sudakov, I.V. Lopa, A.I. Efimova

Simulated the propagation of longitudinal waves of the normal stresses in the spindle shutter pipeline of elastic - viscoplastic material when dynamically loading as a result of water hammer. It is shown that the solution of the problem is sensitive to the change of the velocity of deformation, not only quantitatively but qualitatively depends on a material spindle and the reflection of the front of the wave front from its ends significantly modifies the stress - strain state of the material.

Key words: longitudinal waves, spindle shutter, water hammer, front of the wave, reflection, stress - strain state.

Sudakov Sergej Pavlovich, candidate of technical Sciences, associate Professor, pmdm@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula state University,

Lopa Igor Vasil'evich, doctor of technical Sciences, Professor, pmdm@tsu.tula.ru Russia, Tula, Tula state University,

Efimova Anna Igorevna, postgraduate, pmdm@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula state University

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ТРАССИРОВКИ ВОЛНОВОДНЫХ ТРАКТОВ

Р.Р. Анамова, А.В. Ордин, А.В. Рипецкий

Рассмотрена методика автоматизации пространственной трассировки волноводных трактов крупноапертурных фазированных антенных решеток с применением тополого-геометрического метода. В основу трассировки положена разработанная авторами методика обеспечения равнодлинности ветвей тракта на основе топологических приемов. Методика автоматизации реализована в программном модуле трассировки волноводных трактов WDS, интегрированном с системой геометрического моделирования SolidWorks.

Ключевые слова: волноводный тракт, автоматизация, трассировка, тополого-геометрический метод, фазированная антенная решетка.

В состав современных наземных радиолокационных станций (РЛС), радиолокационных комплексов противоракетной и противовоздушной обороны, стрельбовых комплексов входят крупноапертурные фазированные антенные решетки (ФАР). Неотъемлемой частью ФАР являются линии передачи электромагнитной энергии (тракты). Особый интерес представляет задача проектирования волноводных трактов, соединяющих делитель мощности с излучателями и расположенных внутри конструкции апертуры ФАР. Это связано с тем, что к конструкции таких трактов предъявляются жесткие требования, между тем при их реализации проектировщик сталкивается с массой ограничений, что создает предпосылки для автоматизации процесса.

Проведенный анализ систем автоматизированного проектирования (САПР), применяемых в радиотехнической промышленности [1], показал, что задача автоматизированной трассировки волноводных трактов ФАР не решена в полном объеме. Настоящая статья посвящена описанию разработанной авторами методики автоматизации пространственной трассировки волноводных трактов, расположенных внутри конструкции апертуры ФАР.

Целью исследования является сокращение сроков и снижение себестоимости проектирования наземных ФАР радиолокационных комплексов путем разработки научно-методического и программного обеспечения САПР, позволяющего производить автоматизированную пространственную трассировку волноводных трактов внутри конструкции апертуры ФАР с заданными ограничениями.

Исходными данными для трассировки являются:

набор параметров, задающих краевые условия (координаты входов излучателей, координаты выходов делителя мощности);

набор исходных параметров, определяющих ограничения (геомет-

рические характеристики апертуры ФАР; углы изгиба волноводной линии; радиусы изгиба волноводной линии; минимальная длина прямого участка; параметры несущих металлоконструкций, расположенных внутри монтажного пространства апертуры).

К геометрии тракта предъявляются радиотехнические и технологические требования, которые сформулированы в виде ограничений Ω_U :

требование равнодлинности волноводных линий тракта;
ограничение на длины начального и конечного («заходных») участков и на длины прямых участков между точками изгиба трассы;
ограничение на углы и радиусы изгиба траектории;
обеспечение требуемого расстояния между слоями трассировки;
прокладывание трасс в пределах монтажного пространства апертуры;

условие, обеспечивающее непересечение трасс друг с другом, и ограничение на расстояние между трассами одного слоя;

зоны, запретные для трассировки.

Исходя из вышеперечисленных требований к трассировке, задача трассировки волноводных трактов внутри конструкции апертуры ФАР может быть представлена как задача многокритериальной дискретной оптимизации:

минимизировать целевую функцию с учетом ограничений Ω_U :

$$t^* = \arg \min F(t), \quad (1)$$

где $t \in T$, $F(t)$ – целевая функция; t – вариант трассировки, заданный в виде параметрически описанных координат точек трасс: $t = \{x_j(\xi), y_j(\xi), z_j(\xi)\}, j = \overline{1, N}$, где N – число ветвей тракта, равное числу излучателей (выходов делителя); T – множество вариантов трассировки, удовлетворяющих ограничениям Ω_U и краевым условиям; t^* – оптимальный вариант трассировки.

Целевая функция записана в виде:

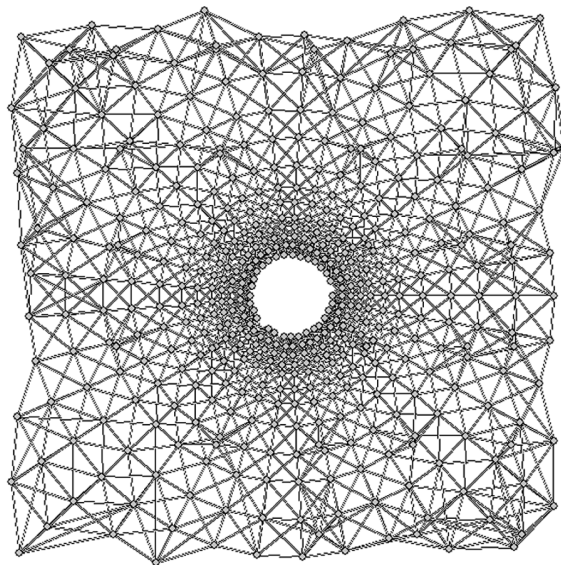
$$F(t) = \sum_p \varphi_p(t),$$

где $\varphi_p(t)$ – критерии оптимизации трассировки; $\varphi_1(t) = \sum L_j, j = \overline{1, N}$ – суммарная длина тракта, N – число излучателей; $\varphi_2(t) = K_t$ – число изгибов волноводных линий тракта.

Для решения поставленной задачи (1) применен тополого-геометрический метод. Трассировка производится в два этапа. На первом этапе трассировки – проведение трасс минимальной длины – применяется жесткая фиксация трасс в реальных физических координатах (геометрический метод). Это позволяет точно определить длину каждой трассы и величину, на которую требуется ее скорректировать для получения равнодлинности всех трасс. На втором этапе – достижение равнодлинности –

применяется предложенная авторами методика на основе топологических приемов.

Существенной особенностью используемой методики трассировки волноводных ветвей тракта является применение разработанной модели сегментного рабочего поля (СРП) в виде адаптивной радиальной сетки взамен традиционного дискретного рабочего поля (рис. 1). Такая модель позволяет сократить время расчета и улучшить качество результата трассировки применительно к решаемой задаче.



**Рис. 1. Модель сегментного рабочего поля
в виде адаптивной радиальной сетки**

Сегменты в совокупности с вершинами образуют сеть, покрывающую рабочее поле. Трасса в предложенной модели рабочего поля может входить и выходить из узлов сетки только по сегментам. Если два соседних узла не соединены сегментом, то между ними не может быть проложена трасса. Сегмент представляет собой вектор, то есть для него задаются не только начальная и конечная вершина, но и направление. Тем самым, два соседних узла могут быть соединены двумя сегментами, имеющими противоположные направления.

На СРП накладываются следующие ограничения:
в каждый узел может входить только одна трасса;
сумма трасс, входящих в узел, равна сумме трасс, исходящих из узла.

Адаптивная радиальная сетка представляет собой множество точек на плоскости, упорядоченных на пересечениях лучей и концентрических окружностей.

Настраиваемые параметры адаптивной радиальной сетки:
радиусы концентрических окружностей r ;

полярный угол φ .

Основная цель разработки методики обеспечения равнодлинности – увеличение длины коротких трасс до базовой длины волноводной линии.

В [2] описаны методики корректировки длин трасс, основанные на механизме удлинения коротких трасс до требуемой длины путем вставки дополнительных элементов («змеек», меандров и т.п.), не меняя при этом топологии самих трасс. К недостатку такого подхода относится то, что для такого удлинения трассы необходимо иметь достаточно свободного пространства. Причем в некоторых случаях при этом может потребоваться удлинение и более коротких проводников. Поэтому перспективным является удлинение проложенных трасс с одновременной корректировкой их топологии. Это позволяет реализовать применяемый тополого-геометрический метод трассировки.

Входной информацией на топологическом этапе является геометрия трасс, полученная после первого (геометрического) этапа трассировки. Макроструктура трасс описана в реальных физических координатах рабочего поля.

На топологическом этапе производится корректировка длин трасс с помощью разработанной методики. Методика включает в себя следующую последовательность:

1) расчет длин трасс и выбор максимальной из них («базовой» длины):

$$l_i = \sqrt{(x_{1i} - x_{2i})^2 + (y_{1i} - y_{2i})^2 + (z_{1i} - z_{2i})^2}, \quad L_j = \sum_i l_i, \quad l_b = \max\{L_j\}.$$

2) определение свободных областей Ω для удлинения трасс: $L_i \subset \Omega, L_i^{\min} \leq L_i \leq L_i^{\max}, L_b \in \{\bar{L}_i\} \Rightarrow L_i = L_b$. Если для какой-либо трассы такая область отсутствует, то происходит сдвиг соседних трасс для ее высвобождения: $L_b \notin \{\bar{L}_i\} \Rightarrow \Omega \rightarrow \Omega_1$.

3) освобождение фиксации трасс в выделенных областях (переход от геометрического этапа к топологическому);

4) «растягивание» трассы в выбранную область до достижения базовой длины с точностью до топологической эквивалентности;

5) фиксация трасс и проверка выполнения условия равнодлинности.

В качестве критерия оптимальности принимается минимальное количество изгибов трассы.

Предложенная методика обеспечения равнодлинности применяется на втором этапе трассировки, который реализуется с помощью топологического метода. Согласно определению, данному в [3, с.46], метод может называться топологическим, если в процессе трассировки пути проводника фиксируются с точностью до топологической эквивалентности. Однако на этапе топологизации модели (ослабление фиксации трасс) возникают сложности в определении геометрии трассы. В связи с этим в [3] обосно-

вана необходимость применения двух моделей для разных этапов трассировки (топологического и геометрического).

Выявление свободных областей Ω для удлинения трасс производится на основании оценки заполнения рабочего поля. Для каждой вершины, через которую проходит трасса, требующая удлинения, выбирается окрестность. Вершины, попавшие в окрестность, анализируются на предмет прохождения через них трассы. Удлинение трассы производится в область, где расположено наибольшее количество свободных вершин.

Переход от геометрического этапа к топологическому осуществляется посредством локальной топологизации модели рабочего поля. Топологизация производится в свободных областях Ω , выделенных для удлинения трассы (рис. 2) путем перехода к «квазисегментному» рабочему полю.

В [4] приведен способ разбиения рабочего поля, названный автором «квазитриангуляцией». Вершинами такой триангуляции служат не точки, а произвольно наклоненные отрезки. В отличие от обычной триангуляции, кратчайший путь между вершинами лежит не обязательно внутри квазиребра. Принцип построения квазиструктуры основан на (мысленной) замене каждого отрезка топологии на множество тесно (в пределе – бесконечно близко) расположенных точек и построения для всех этих точек триангуляции Делоне.

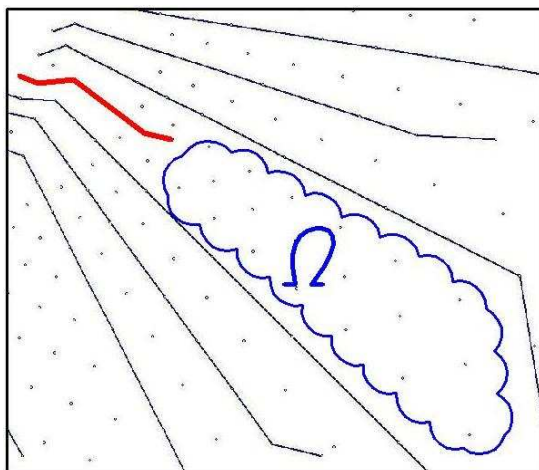
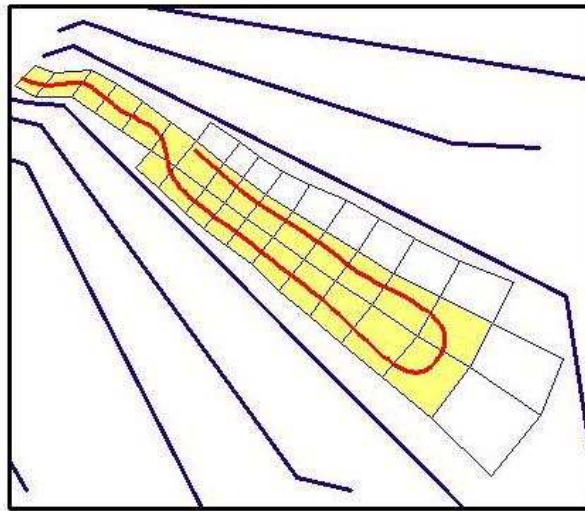


Рис. 2. Выделение области для удлинения трассы (красным цветом обозначена трасса, требующая удлинения)

В рассматриваемой задаче трассировки геометрия кратчайших трасс получена с помощью модели СРП. Переход от модели СРП к топологической модели можно осуществить с помощью аналогичного подхода. Каждый сегмент, по которому проходит загруженная трасса, заменяется элементарной площадкой – дискретом. В данном случае дискрет имеет форму четырехугольника, но может быть и произвольным многоугольни-

ком. При этом вершина, через которую проходит трасса, преобразуется в отрезок. Начальная и конечная точки отрезка представляют собой средние точки соседних сегментов и являются зафиксированными на рабочем поле. Трасса же может свободно перемещаться внутри отрезка, так как теперь уже фиксируется сам факт пересечения ею отрезка, а не конкретная точка. Аналогичное преобразование выполняется в области Ω , выбранной для удлинения трассы. Полученное после преобразования рабочее поле назовем квазисегментным, поскольку оно сохраняет основные свойства сегментного поля, а полученные дискреты - квазисегментами. Локальная топологизация рабочего поля представлена на рис. 3.



**Рис.3. Топологический этап трассировки:
топологизация трассы и ее удлинение**

Растягивание трассы осуществляется посредством «захвата» соседних дискретов. При этом трасса прокладывается в «коридоре» (на рис. 3 показан желтым цветом), образованном квазисегментами, а длина трассы находится в пределах множества $L = \{l_{\min}, \dots, l_{\max}\}$, где $l_{\max} = \sum_i a_i, i = 1, \dots, n; l_{\min} = \sum_i b_i$, где a_i, b_i – длины отрезков, образующих максимальную по длине и минимальную по длине стенки коридора соответственно. При этом чтобы в последующем на этапе геометрической коррекции прийти к равнодлинности с заданным допуском, минимально возможная длина трассы дотягивается до базовой длины: $l_{\min} = l_b$. Тогда в случае, если после фиксации трассы длина ее окажется больше базовой, трассу можно скорректировать до требуемой длины геометрическими приемами.

Завершает процесс удлинения трассы ее фиксация в реальных физических координатах СРП. После перехода к сегментному рабочему полю осуществляется проверка равнодлинности трасс.

Преимущества предложенной методики по сравнению с существующими методиками корректировки длин трасс:

- минимальное количество изгибов волноводных линий тракта;
- обеспечение 100%-ой трассировки равнодлинных трасс;
- трассировка под произвольными углами.

В случае трассировки волноводных линий одного и того же тракта в несколько слоев математическая модель принимает вид непланарного графа, и при этом возникает задача распределения ребер графа по слоям. Необходимость многослойной трассировки, как правило, бывает вызвана большим числом волноводных элементов, которые необходимо разместить внутри ограниченного пространства апертуры ФАР и соблюсти при этом заданные ограничения. В настоящей работе рассматривается двухслойная трассировка, как наиболее часто применяемая. Однако аналогичный подход может быть применен и для трех и более слоев трассировки.

При решении задачи двухслойной трассировки задача решается в несколько этапов:

1. Получение совмещенной топологии трасс: прокладываются волноводные линии минимальной длины, при этом разрешается пересечение трасс, но не более двух в каждой точке пересечения.

2. Расслоение совмещенной топологии: точки пересечения волноводных линий отмечаются как точки перехода на второй слой, к ним добавляются переходные участки, расположенные перпендикулярно плоскостям трассировки. Длина переходного участка определяется заданным расстоянием между плоскостями трассировки.

3. Вычисление базовой длины волноводной линии с учетом длины переходного участка.

4. Корректировка длин трасс до достижения их равнодлинности по методике.

Математически этап расслоения совмещенной топологии трасс можно представить как переход от планарного графа к пространственному. Подобный подход применительно к трассировке печатных плат был обоснован в [3]. Отличием описанного решения для пространственной трассировки волноводного тракта от подхода, описанного в [3], является применение СРП вместо ДРП и отсутствие оптимизации количества слоев ввиду редкой применимости трассировки волноводов в три и более слоя из-за ограниченного монтажного пространства апертуры.

Описанная методика трассировки волноводных трактов на основе тополого-геометрического метода реализована в программном модуле Waveguide Design Solution (WDS), интегрированном с системой геометрического моделирования SolidWorks. Тестирование программного модуля для реальных конструкций ФАР (рис. 4) подтвердило адекватность расчетной модели и точности алгоритмов. Отклонение характеристик рассчитанных трасс от эталонных требований не превышает 5% (погрешность на

равнодлинность трасс).

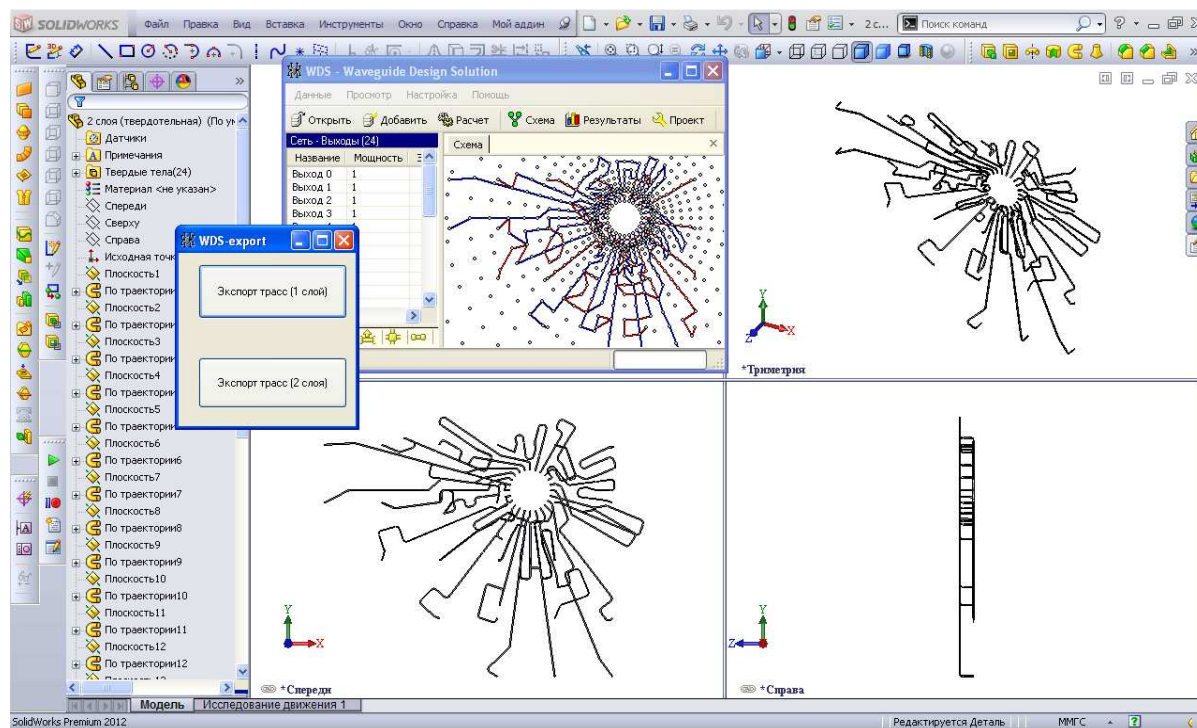


Рис. 4. Результат пространственной трассировки волноводного тракта подрешетки ФАР из 24 излучателей (2 слоя)

Таким образом, разработано методическое обеспечение автоматизации трассировки волноводных трактов на основе тополого-геометрического метода с применением сегментной модели рабочего поля. Предложена методика корректировки длин трасс до достижения равнодлинности. Методики программно реализованы и показали удовлетворительные результаты при расчете реальных конструкций.

Список литературы

1. Анамова Р.Р. Проблемы трассировки волноводов в антенных устройствах авиационной спутниковой связи // Труды МАИ: электронный журн. 2013. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=40232> (дата обращения: 27.07.2013).
2. Лысенко А.А., Полубасов О.Б. Обеспечение заданной длины проводников в САПР ТороR // Современные электронные технологии, 2009. №4. С. 3-21.
3. Дмитриев П.И. Математическое и программное обеспечение автоматизированного проектирования тонкопленочных микросборок. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 2003г.
4. Полубасов О.Б. Математические модели и алгоритмы автоматизации

зированной разводки соединений печатных плат и БИС. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 2001.

Анамова Рушана Ришатовна, асп., anamova.rushana@yandex.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Ордин Алексей Вячеславович, асп., 123land@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Рипецкий Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доц., a.ripetskiy@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

THREE DIMENSIONAL WAVEGUIDE LAYOUT DESIGNING AUTOMATION METHODOLOGY

R.R.Anamova, A.V. Ordin, A.V.Ripetskiy

Three dimensional waveguide layout designing automation methodology is reviewed. The proposed methodology based on topological-geometric routing method. A new method of equal length waveguide transmission lines routing using topological procedures is suggested. Suggested methodology is realized in the software module WDS based on SolidWorks system.

Key words: waveguide transmission line, automation, layout, topological-geometric routing method, phased antenna array.

Anamova Rushan Rishatovna, postgraduate, anamova.rushana@yandex.ru, Russia, Moscow, Moscow aviation Institute (national research University),

Ordin Aleksey Vjacheslavovich, postgraduate, 123land@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow aviation Institute (national research University),

Ripeckij Andrey Vladimirovich, candidate of technical University, associate Professor, a.ripetskiy@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow aviation Institute (national research University)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СМЕСИТЕЛЯ ИНТЕНСИВНОГО ДЕЙСТВИЯ

К.В. Звягин, В.И. Золотухин, Г.М. Варьяш

Рассмотрена усовершенствованная конструкция смесителя интенсивного действия. Получены основные конструктивные параметры, представлена параметрическая зависимость объема и внутреннего диаметра ёмкости смешивания смесителя.

Ключевые слова: смеситель интенсивного действия, ёмкость смешивания, процесс смешивания, смесь.

Технологический процесс производства огнеупорных изделий методом литья в формы с последующим виброформованием подразумевает предварительное получение замеса огнеупорной смеси обладающего максимальной текучестью. Подобную смесь можно получать на смесителях механического действия с максимальной интенсификацией процесса смешивания, т.е. с большой частотой вращения рабочего органа и особенностью конструкции исполнительных механизмов. При этом конструкция смесителя должна максимально обеспечивать проявление тиксотропных свойств огнеупорной массы. Одной из основных задач при разработке смесителя является удобство его обслуживания (загрузка и выгрузка компонентов, очистка ёмкости и рабочего органа после работы). Для смесителей основными конструктивными параметрами являются геометрические размеры ёмкости смешивания и рабочего органа [1,2,3].

Для определения основных параметров необходимо задаться требуемой массой получаемой смеси. Определение номинального объёма ёмкости смешивания производится по формуле

$$V = \frac{m}{\rho},$$

где V - номинальный объём ёмкости смешивания, м³; m -масса смеси, кг; ρ - плотность смеси, кг/ м³.

Ориентировочный номинальный объем, и внутренний диаметр ёмкостей смешивания указан в табл. 1.

Числовые значения номинальных объёмов ёмкости для смешивания округляются в большую сторону до значений, указанных в табл. 1. По номинальному объёму V определяется соответствующий диаметр ёмкости.

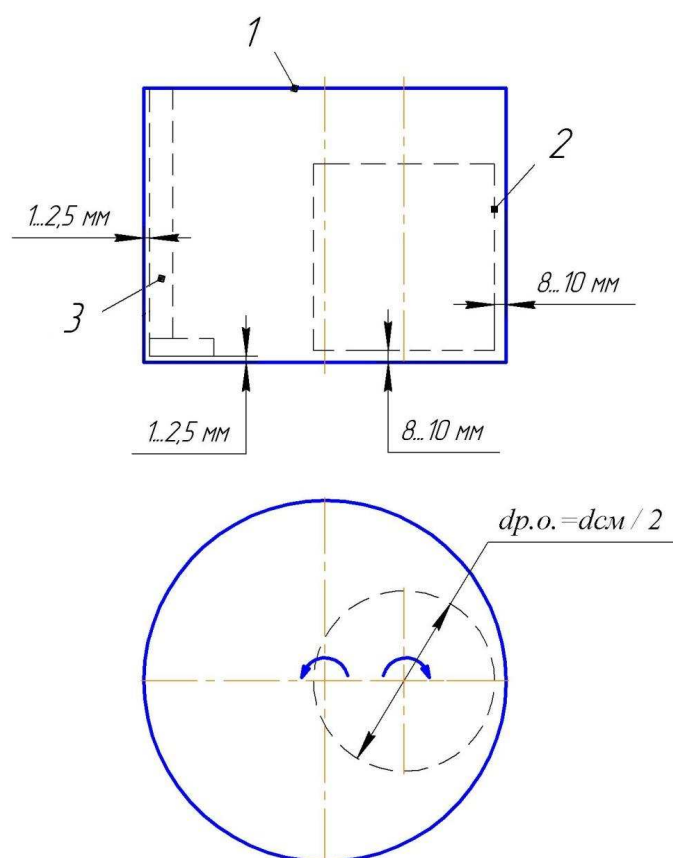
Принцип работы смесителя основан на интенсивном противоточном смешивании. Смеситель имеет смещенный относительно центра быстро вращающийся рабочий орган и вращающуюся ёмкость смешивания. Быстро вращающийся рабочий орган смещен относительно центра ёмкости смешивания. На рис. 1 показаны основные конструктивные пара-

метры смесителя.

Таблица 1

Ориентировочный номинальный объём и внутренний диаметр ёмкостей смешивания

Номинальный объём $V, \text{ м}^3$	0,014	0,025	0,05	0,1	0,16	0,25	0,4	0,65
Внутренний диаметр $d, \text{ м}$	0,28	0,32	0,4	0,54	0,61	0,7	0,8	1



**Рис. 1. Основные конструктивные параметры смесителя:
1 – ёмкость смешивания; 2 – рабочий орган; 3 – модернизированный
подпружиненный донно-боковой скребок**

Отношение высоты ёмкости смешивания h к диаметру d определяется соотношением

$$\frac{h}{d} = \frac{3}{4}.$$

Лопатки рабочего органа смесителя приближаются к боковой стенке смешивания периодически, на очень короткий промежуток времени.

В предлагаемой схеме смешивания присутствует подпружиненный донно-боковой скребок, следовательно, для обеспечения наилучших эксплуатационных условий расстояние между боковой стенкой и дном ёмкости смешивания, с одной стороны и рабочим органом – с другой, следует выбирать на 1...2 мм больше чем самая крупная фракция смешивающихся компонентов. Таким образом, получается, что это расстояние должно быть в пределах 10...11 мм. Это способствует значительно большей долговечности рабочего органа и ёмкости смешивания по сравнению с моделями смесителей в конструкции, которых отсутствует донно-боковой скребок.

Диаметр рабочего органа $d_{p.o.}$ принимается по соотношению

$$d_{p.o.} = \frac{d}{2}.$$

Самой распространённой формой рабочих органов смесителей является лопастная, состоящая из нескольких лопастей, укрепленных на вращающемся валу. Лопасты могут располагаться в горизонтальной или вертикальной плоскостях. Лопасты лежат в плоскости оси вала или наклонены к плоскости, перпендикулярной к последней, под некоторым углом, обычно равным 45° или 60°. Применение лопастных рабочих органов обусловлено простотой их конструкции.

Производительность смесителя определяется по формуле

$$\Pi = \frac{60 \cdot m}{t_{см} + t_{заг} + t_{раз}},$$

где Π - производительность смесителя, кг/ч; m - масса получаемой смеси, кг; $t_{см}$ - время, необходимое для смешивания, мин; $t_{заг}$ - время, необходимое для загрузки, мин; $t_{раз}$ - время, необходимое для разгрузки, мин. Разработанная машина относится к смесительным установкам ёмкостью до 140 литров периодического действия с опрокидывающейся ёмкостью и предназначено для улучшения и упрощения качества разгрузки смесителя. Данный смеситель может быть применен в любой отрасли промышленности, где требуется смешивание сухих, влажных, тестообразных или пастообразных компонентов.

Техническое решение поясняется чертежами, где на рис. 2 изображен общий вид смесителя в рабочем положении, а на рис. 3 узел крепления рабочей части инструмента для очистки стен и дна ёмкости к стойке.

Работает смеситель следующим образом.

Смешиваемые компоненты загружают в ёмкость 6 смесителя с помощью дозаторов через технологическое отверстие с воронкой 5 в крышке 4 или любым способом при поднятой с помощью гидроцилиндра 11 крышке 4 ёмкости 6. В случае загрузки ёмкости 6 компонентами при поднятой крышке, после их загрузки, крышку 4 с помощью гидроцилиндра 11 опускают. С пульта управления (на чертежах не показан) включают электродвигатель 10, который через клиноременную передачу вращает смеситель-

ный инструмент 18, и мотор-редуктор 17, обеспечивающий вращение емкости 6. Время смешения устанавливают с помощью таймера. По окончании процесса смешения автоматически прекращается вращение емкости 6 и смесительного инструмента 18. С пульта управления включают гидроцилиндр 11, который, поворачивая траверсу 8 вокруг оси 9, поднимает крышку 4, вынимая из емкости 6 смесительный инструмент 18. Включают гидроцилиндр 1, который, перемещая рейку, вращает шестерню 3, жестко соединенную с одной из стоек 13. Стойки 13 поворачиваясь, поднимают опрокидывающуюся платформу 16, опрокидывая емкость 6. Включают мотор-редуктор 17, обеспечивая вращение емкости 6. Постоянно находящийся в емкости 6 инструмент 7, производит очистку стен и дна емкости от налипшей смеси. Вертикальная часть инструмента 7 с помощью пружины 4 прижата к стенке емкости 6, компенсируя погрешности формы и биение емкости 6 (см. рис. 2). Прижим горизонтальной части рабочего инструмента 7 к дну емкости 6 осуществляют с помощью регулировочного механизма 1 (см. рис. 3). Наличие инструмента 7 для очистки стен и дна емкости 6 обеспечивает полную и качественную выгрузку полученной смеси. Выгрузку смеси могут производить или в емкость, которую устанавливают или подкатывают под емкость 6 или на транспортер.

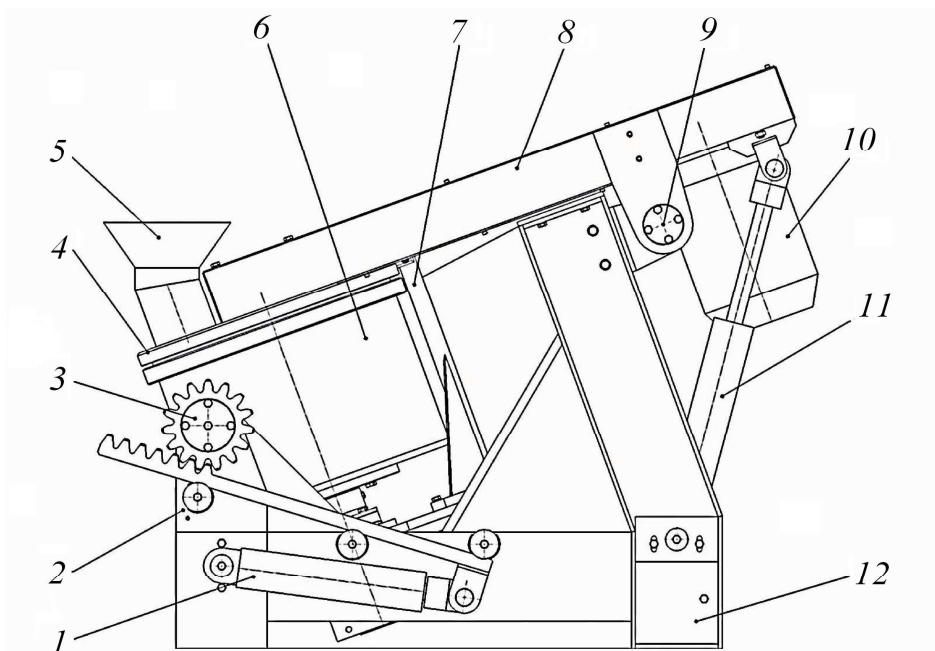
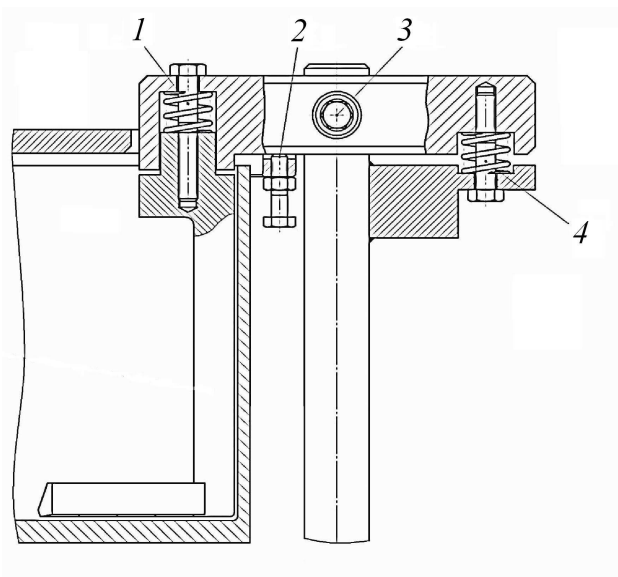


Рис. 2. Общий вид смесителя в рабочем положении: 1 – гидроцилиндр; 2 – опора ёмкости смешивания; 3 – шестерня; 4 – крышка ёмкости смешивания; 5 – приёмная воронка; 6 – ёмкость смешивания; 7 – инструмент очистки дна стенки ёмкости смешивания; 8 – траверса; 9 – ось вращения траверсы; 10 – электродвигатель; 11 – гидроцилиндр; 12 – станина смесителя



**Рис. 3. Инструмент очистки дна и стенки ёмкости смешивания:
1 – регулировочный механизм; 2 – регулировочный болт; 3 – ось;
4 – пружина**

Подпружиненный инструмент очистки дна и стенки ёмкости смешивания в смесителе интенсивного действия обеспечивает:

высокое качество смешивания, подтвержденное множественными испытаниями;

уменьшение нагрузки на мотор-редуктор привода ёмкости смешивания;

отсутствие загрязнений и налипания смешиваемой массы на стенки и дно ёмкости смешивания;

упрощение выгрузки готовой смеси из смесителя;

увеличение срока службы рабочего органа.

Был проведен ряд экспериментов и после сравнения результатов, (табл. 2) оказывалось, что при использовании подпружиненного «скребка» показатели качества стали выше показаний экспериментов со статичным инструментом очистки дна и стенки ёмкости смешивания.

При использовании стационарного инструмента очистки дна и стенки ёмкости смешивания происходит следующее: в процессе вращения абразивный материал (корунд) попадая в пространство между либо стенкой и «скребком», либо дном и «скребком» способствует подклиниванию ёмкости смешивания, что в некоторых случаях влечет за собой аварийную остановку смесителя. Если увеличить расстояние до дна и стенки ёмкости и принять его большим на 1...2 мм. самой крупной фракции, то происходит налипание мелкой фракции на стенки чаши, что ухудшает качество смешивания и осложняет очистку ёмкости после работы.

Таблица 2

Результаты экспериментов с использованием подпружиненного «скребка»

№ опыта	С использованием подпружиненного «скребка»			Без использованием подпружиненного «скребка»		
Параметр	$\rho_{\text{каж}}$ г/см ³	$P_{\text{откр}}$ %	$\sigma_{\text{сж}}$ МПа	$\rho_{\text{каж}}$ г/см ³	$P_{\text{откр}}$ %	$\sigma_{\text{сж}}$ МПа
1	3,21	3,9	98,8	3,11	4,9	101,4
2	3,3	3,3	101,3	3,15	5	105,6
3	3,15	4	115	3,12	5,1	101,3
4	3,29	4,1	111,7	3,09	4,5	103,5
5	3,3	3,7	112,5	3,05	4,8	97,7
6	3,4	3,8	112	3,17	4,4	95,3
7	3,31	4,1	121,3	3,18	5,1	95,8
8	3,24	4,3	118,7	3,07	5,2	99,7
9	3,19	4	114,9	3,2	4,8	100,1
10	3,26	3,9	115	3,11	4,7	98,8

На рис. 4 - 6 изображены сравнительные графики результатов экспериментов с использованием подпружиненного «скребка» и без него.

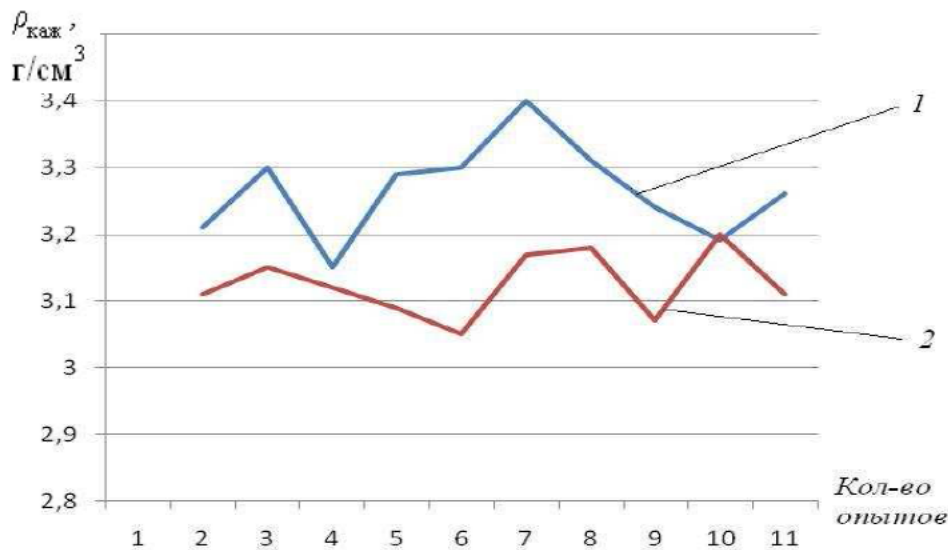


Рис. 4. Сравнительный график зависимости кажущейся плотности: 1 – с использованием подпружиненного «скребка»; 2 – без использования подпружиненного «скребка»

Обычно в процессе приготовления тиксотропной массы с низким содержанием воды в начале смешивания, когда вода еще не полностью распределилась по всему объему ёмкости смешивания, происходит налипание мелкой фракции на верхнюю часть стенки чаши, что ведет к потере основной массы замеса.

После смешивания ёмкость с готовой массой с помощью гидравлики опрокидывается и начинается процесс выгрузки. Инструмент очистки дна и стенки ёмкости смешивания обеспечивает полную выгрузку приготовленной массы в бункер разгрузки без остатков.

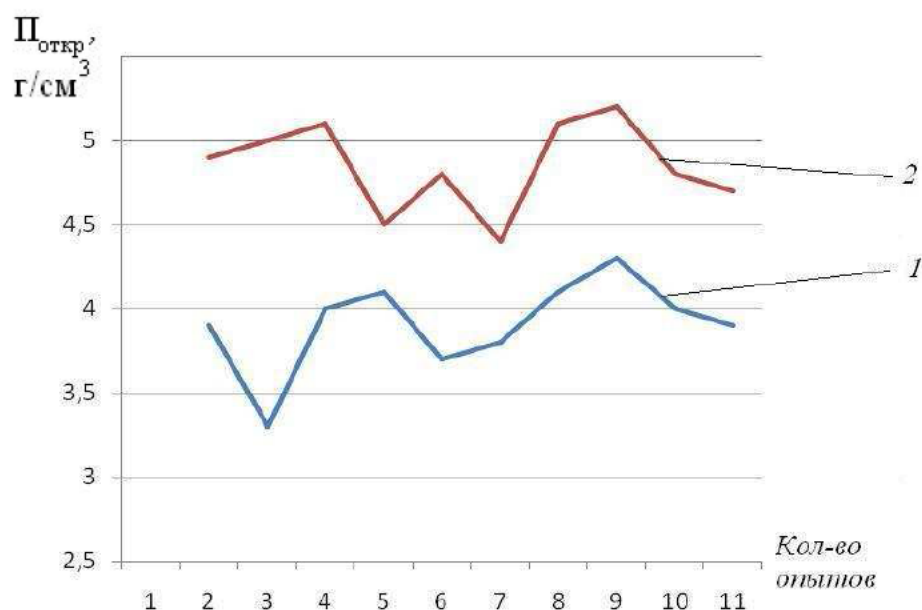


Рис. 5. Сравнительный график зависимости открытой пористости:
 1 – с использованием подпружиненного «скребка»;
 2 – без использования подпружиненного «скребка»

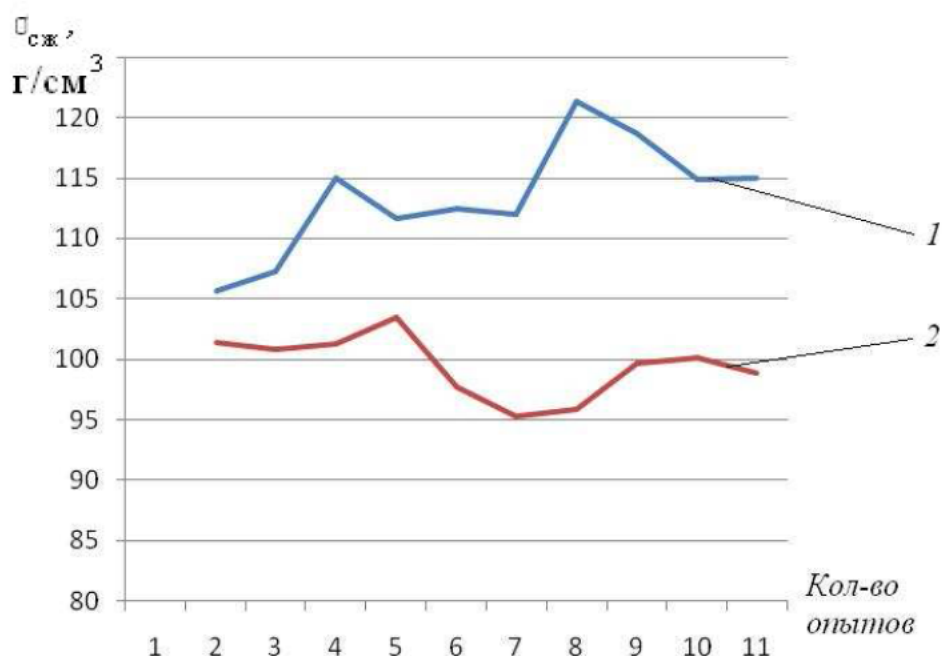


Рис. 6. Сравнительный график зависимости предела сжатия:
 1 – с использованием подпружиненного «скребка»;
 2 – без использования подпружиненного «скребка»

При использовании подпружиненного скребка расстояние от стенки и дна ёмкости смешивания до рабочего органа устанавливается большое, приблизительно в 1,5...2 раза больше самой крупной фракции, что значительно увеличивает срок службы твердосплавных пластин рабочего органа.

Испытания опытного образца смесителя на производственном участке производства огнеупорных изделий фирмы ООО НПП «Вулкан-ТМ» показали высокое качество получаемой смеси, хорошую работоспособность смесителя, его надежность, удобства обслуживания и эксплуатации. Испытания показали, что особенно хорошо зарекомендовать себя данный смеситель может при многономенклатурном производстве, где требуется производить различные смеси в относительно небольшом объеме.

Список литературы

1. Модестов В.Б. Определение мощности смесителя, необходимой при смешивании сыпучих материалов // Хим. и нефтегазовое машиностроение. М: Машиностроение, 2003. № 3. С. 7 - 8.

2. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.М. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчёта. М: Химия, 1984. 336 с.

3. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Машиностроение, 1973. 215 с.

Звягин Кирилл Викторович, аспирант, kirill-zv88@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Золотухин Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф., info@vulkantm.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет, научно-производственное предприятие «Вулкан-ТМ»

Варьяш Георгий Михайлович, канд. техн. наук, доц., info@vulkantm.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет, научно-производственное предприятие «Вулкан-ТМ»

IMPROVEMENT OF THE INTENSIVE MIXER DESIGN

K.V. Zvyagin , V.I. Zolotuhin, G.M. Varyash

The improved design of the intensive mixer is consider. The basic design parameters are obtained. Parametric dependence of volume from the inner diameter of the mixing container are represented.

Key words: Intensive mixer, mixing container, the mixing process, the mixer.

Zvyagin Kirill Viktorovich, postgraduate, info@vulkantm.com, Russia, Tula, Tula State University,

Zolotuhin Vladimir Ivanovich, doctor of technical science, professor, info@vulkan-tm.com, Russia, Tula, Tula State University, science-manufacturing enterprise «Vulkan-TM»,

Varyash Georgiy Mihalovich, candidate of technical science, docent, Russia, Tula, Tula State University, science-manufacturing enterprise «Vulkan-TM»

УДК 539.4; 623.4

ОЦЕНКА ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КОНИЧЕСКИХ УЧАСТКОВ ЗАТВОРОВ ТРУБОПРОВОДОВ

С.П. Судаков, И.В. Лопа, А.И. Ефимова

Моделируется нагружение конических участков затворов, приводящее к потере продольной устойчивости. Решение строится методом последовательных приближений. Показано, что уже второе приближение дает сходимость решения. Получены формулы для оценки продольной устойчивости конических участков затворов трубопроводов.

Ключевые слова: нагружение, конические участки, продольная устойчивость, сходимость решения.

В клиновых задвижках трубопроводов шпиндели имеют конические участки. Например, в качестве конического участка необходимо рассматривать клин затвора трубопровода. По условиям функционирования такая конструкция испытывает значительные напряжения продольного сжатия и возникает проблема ее расчета на устойчивость. В этом случае расчет на устойчивость нельзя провести по классической схеме Л. Эйлера, так как она подразумевает использование описания формы изогнутой оси стержня после потери устойчивости симметричной функцией вида: $y = c_0 \sin \frac{\pi z}{L}$. Очевидна фактическая несимметричность функции $y(z)$ и прямая связь последней с величиной $P_{кр}$.

Уравнение, описывающее равновесное положение в изогнутом виде, записывается так [1] (рис.1):

$$EJ(z) \frac{d^2 y}{dz^2} = -Py(z), \quad (1)$$

где $J(z) = \frac{\pi(y_0 - \alpha z)^4}{4}$; $\alpha = \frac{y_0 - y_l}{L}$.

Точное решение (1) возможно только в специальных функциях. Получим приближенное решение, используя метод последовательных приближений.

В качестве первого приближения предлагается функция вида:

$$y_0(z) = a(\beta\alpha z^3 + (1 - \beta\alpha)lz^2 - l^2z), \quad (2)$$

где β - аппроксимирующий коэффициент.

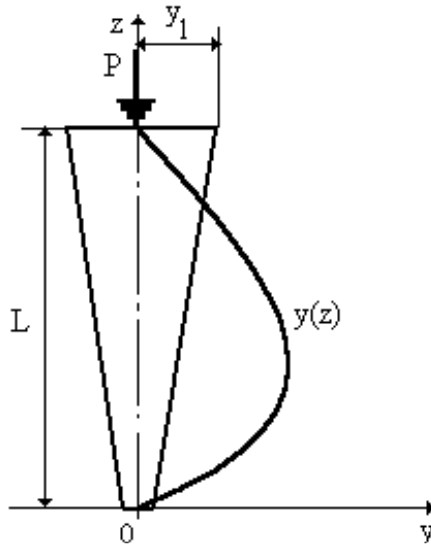


Рис.1. Положение стержня в изогнутом виде

Подставляя (2) в правую часть (1) получили обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка с разделяющимися переменными:

$$\frac{d^2 y_1(z)}{dz^2} = - \frac{4P_1 a(\beta\alpha z^3 + (1 - \beta\alpha)lz^2 - l^2z)}{\pi E (y_0 - \alpha z)^4}. \quad (3)$$

После последовательного интегрирования (3) получили второе приближение:

$$y_1(z) = - \frac{4P_1 a}{\pi E \alpha^5} \left[-\ln|y_0 - \alpha z|(\alpha l + \beta\alpha(4y_0 - \alpha l)) + \beta\alpha^2 z(\ln|y_0 - \alpha z| - 1) + \right. \\ \left. + \frac{(y_0 - \alpha l)(\beta\alpha y_0^2 + \alpha y_0 l)}{6(y_0 - \alpha z)^2} + \frac{\alpha l(\alpha l + 2\beta\alpha y_0) - \alpha y_0(2l + 3\beta\alpha y_0)}{2(y_0 - \alpha z)} + \alpha^5 z C_1 + \alpha^5 C_2 \right], \quad (4)$$

где

$$C_1 = \frac{1}{\alpha^5 l} \left[\ln|y_0 - \alpha l|(\alpha l + \beta\alpha(4y_0 - \alpha l)) - \beta\alpha^2 l(\ln|y_0 - \alpha l| - 1) - \frac{\beta\alpha y_0^2 + \alpha y_0 l}{6(y_0 - \alpha l)} - \right. \\ \left. - \frac{\alpha l(\alpha l + 2\beta\alpha y_0) - \alpha y_0(2l + 3\beta\alpha y_0)}{2(y_0 - \alpha l)} - \ln|y_0|(\alpha l + \beta\alpha(4y_0 - \alpha l)) + \right. \\ \left. + \frac{(y_0 - \alpha l)(\beta\alpha y_0^2 + \alpha y_0 l)}{6y_0^2} + \frac{\alpha l(\alpha l + 2\beta\alpha y_0) - \alpha y_0(2l + 3\beta\alpha y_0)}{2y_0} \right].$$

$$C_2 = \frac{1}{\alpha^5} \left[\ln|y_0|(\alpha l + \beta\alpha(4y_0 - \alpha l)) - \frac{(y_0 - \alpha l)(\beta\alpha y_0^2 + \alpha y_0 l)}{6y_0^2} - \frac{\alpha l(\alpha l + 2\beta\alpha y_0) - \alpha y_0(2l + 3\beta y_0)}{2y_0} \right];$$

Для определения первого приближения критического значения силы $P_{кр}$, приравняем амплитуды первого и второго приближений функции $y = y(z)$ при $z = 0.5L$ и, разрешая полученное уравнение относительно $P_{кр}$, получим:

$$P_1 = \pi E (y_0 - y_l)^5 (1 + 0,5\beta\alpha) /$$

$$16l^2 \left[-\ln\left|y_0 - \alpha \frac{l}{2}\right|(\alpha l + \beta\alpha(4y_0 - \alpha l)) + \beta\alpha^2 \frac{l}{2}(\ln\left|y_0 - \alpha \frac{l}{2}\right| - 1) + \frac{(y_0 - \alpha l)(\beta\alpha y_0^2 + \alpha y_0 l)}{6(y_0 - \alpha \frac{l}{2})^2} + \frac{\alpha l(\alpha l + 2\beta\alpha y_0) - \alpha y_0(2l + 3\beta y_0)}{2(y_0 - \alpha \frac{l}{2})} + \frac{1}{2}(\ln|y_0 - \alpha l|(\alpha l + \beta\alpha(4y_0 - \alpha l)) - \beta\alpha^2 l(\ln|y_0 - \alpha l| - 1) - \frac{\beta\alpha y_0^2 + \alpha y_0 l}{6(y_0 - \alpha l)} - \frac{\alpha l(\alpha l + 2\beta\alpha y_0) - \alpha y_0(2l + 3\beta y_0)}{2(y_0 - \alpha l)} - \ln|y_0|(\alpha l + \beta\alpha(4y_0 - \alpha l)) + \frac{(y_0 - \alpha l)(\beta\alpha y_0^2 + \alpha y_0 l)}{6y_0^2} + \frac{\alpha l(\alpha l + 2\beta\alpha y_0) - \alpha y_0(2l + 3\beta y_0)}{2y_0}) + \ln|y_0|(\alpha l + \beta\alpha(4y_0 - \alpha l)) - \frac{(y_0 - \alpha l)(\beta\alpha y_0^2 + \alpha y_0 l)}{6y_0^2} - \frac{\alpha l(\alpha l + 2\beta\alpha y_0) - \alpha y_0(2l + 3\beta y_0)}{2y_0} \right]$$

Легко показать, что при $\alpha = 0$ (цилиндрическая форма) решение совпадает с классическим решением Л. Эйлера. Для нахождения третьего приближения следует повторить описанную процедуру. На рис. 2 иллюстрируется сходимость предложенного решения. Следует отметить, что уже третье приближение фактически совпадает со вторым, что позволяет считать процесс итераций сходящимся.

На рис. 3 представлено изменение критической силы от конусности рассматриваемой конструкции при следующих исходных данных: $y_0 = 10 \text{ мм}$; $L = 100 \text{ мм}$. Видно, что с увеличением угла конусности значение критической силы возрастает по закону близкому к линейному, при-

чем, это изменение существенно и его необходимо учитывать и при небольших углах конусности.

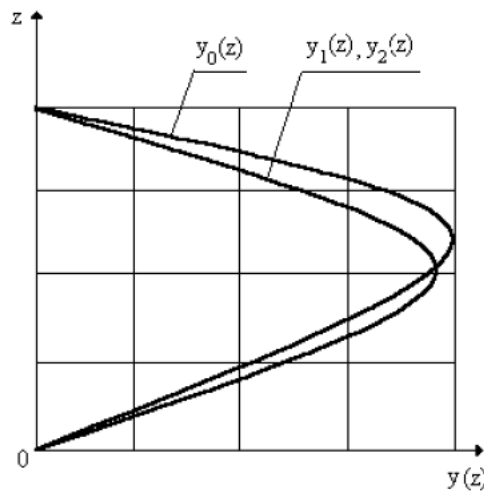


Рис. 2. Изогнутая осевая линия в процессе итераций

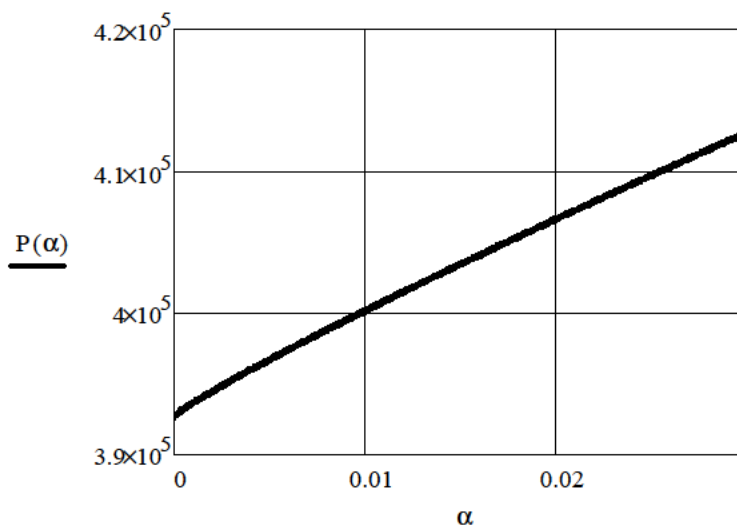


Рис. 3. Зависимость критической силы от конусности

Таким образом, предложен подход для оценки продольной устойчивости конических участков затворов трубопроводов и получены формулы, связывающие устойчивые геометрические параметры конструкции с силовым нагружением затвора трубопровода.

Список литературы

1. Лопа И.В., Патрикова Т.С., Ефимова А.И. Поперечный изгиб винта с учетом изменения момента инерции по его длине.// Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 2. Проблемы специального машиностроения. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 241-245.

Судаков Сергей Павлович, канд. техн. наук, доц., pmdm@tsu.tula.ru Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Лопы Игорь Васильевич, д-р техн. наук, проф., pmdm@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ефимова Анна Игоревна, асп., pmdm@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ASSESSMENT OF LONGITUDINAL STABILITY
CONIC SECTIONS OF THE CLOSURES OF THE PIPELINES

S.P. Sudakov, I.V. Lopa, A.I. Efimova

Simulated loading conic sections of the gates, leading to the loss of longitudinal stability. The solution is constructed by the method of successive approximations. The second approach gives the convergence of the solution. Formulas for estimating the longitudinal stability of the conic sections of the closures of the pipelines.

Key words: loading, conic sections, longitudinal stability, closures of the pipelines.

Sudakov Sergej Pavlovich, candidate of technical Sciences, associate Professor, pmdm@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula state University,

Lopa Igor Vasil'evich, doctor of technical Sciences, Professor, pmdm@tsu.tula.ru Russia, Tula, Tula state University,

Efimova Anna Igorevna, postgraduate, pmdm@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula state University

УДК 621.86: 621.333.4

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПОДЪЁМНО-ТРАНСПОРТНЫХ
МАШИН**

Н.Ч. Хай

В статье приведен структурный метод повышения надежности путем параллельного соединения элементов является структурным резервированием. И в статье тоже приведен принцип резервирования в системе рекуперации в подъемно-транспортных машинах (ПТМ).

Ключевые слова: резервирование, резерв, надежность системы.

Резерв — совокупность дополнительных средств и (или) возможностей, используемых для резервирования.

Резервирование — применение дополнительных средств и (или) возможностей для сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов.

Классификация структурного резервирования по ряду признаков приведена на рис.1.



Рис. 1: Классификация резервирования

Уровень структурного резервирования может быть самым разным: различают общее и раздельное резервирования. Общим называется резервирование, при котором резервируется объект в целом (рис. 2, б, в). При раздельном резервируются отдельные элементы объекта (детали, узлы, блоки, агрегаты) (рис. 2, г, д). Используется также сочетание общего и раздельного резервирования - смешанное резервирование. Раздельное резервирование гораздо эффективнее общего, при этом эффективность повышается при снижении уровня резервирования, т. е. чем меньшая часть объекта резервируется как единое целое, тем больше вероятность безотказной работы объекта.

Постоянное структурное резервирование - резервирование, при котором резервные элементы функционируют наравне с основными в течение всего времени работы и находятся в одинаковом с ними режиме. Постоянное резервирование часто применяется в ПТМ, например два тормоза в механизме подъема литейного крана, подвеска кабины лифта на нескольких канатах.

Вероятность отказа системы при постоянном резервировании определяется как вероятность отказа при параллельном соединении элементов по теореме умножения вероятностей независимых событий произведением вероятностей отказа ее элементов по формуле:

$$F_c(t) = F_1(t)F_2(t)...F_i(t)...F_n(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t) \quad (1)$$

где n - число параллельно соединенных элементов; $F_i(t)$ - вероятность отказа i -го элемента системы.

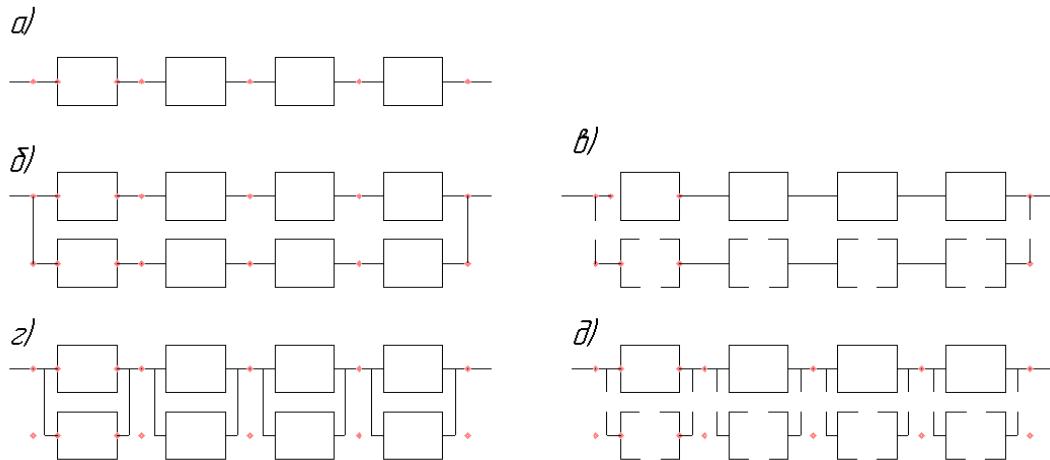


Рис. 2: Структурные схемы различных видов резервирования

При равнонадежных элементах, что обычно имеет место на практике, $F_i(t) = F(t)$ и формула (1) примет вид

$$F_i(t) = F^n(t). \quad (2)$$

Из этой формулы видно, что параллельное соединение элементов является весьма эффективным средством повышения надежности объекта.

Структурное резервирование замещением - резервирование, при котором функции основного элемента передаются резерву только после отказа основного элемента. Передача функций резервному элементу может производиться вручную или автоматически.

Основной и резервные элементы можно рассматривать как единую систему, в которой допускается несколько отказов до того, как она прекратит выполнение своих функций. Поэтому вероятность отказа системы, содержащей n одинаковых элементов, из которых один основной и $n-1$ резервных, при экспоненциальном распределении отказов в периоде нормальной эксплуатации определяется по формуле Пуассона:

$$F_c(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} \exp(-\lambda t), \quad (3)$$

где λ - интенсивность (опасность) отказов.

Экспоненциальную функцию $P(t) = e^{-\lambda t}$ разложим в ряд Маклорена:

$$P(t) = 1 - \lambda t + \frac{\lambda^2}{2!} t^2 - \frac{\lambda^3}{3!} t^3 + \dots \quad (4)$$

и отбросим нелинейные члены, тогда

$$P(t) = e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda t. \quad (5)$$

При высоконадежных элементах λt мало, $\exp(-\lambda t) \approx 1$ и по формуле (5) $\lambda t \approx F(t)$ тогда

$$F_c(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} = \frac{F^n(t)}{n!}. \quad (6)$$

Из формул (2) и (6) следует, что вероятность отказа при резервировании замещением в $n!$ раз меньше, чем при постоянном резервировании, так как резервные элементы не находятся под нагрузкой. Формула (6) справедлива только при условии надежной передачи функций резервному элементу. Если передача функций недостаточно надежна, то выигрыш может быть легко утерян.

Эффективность разных способов структурного резервирования рассмотрим на системе из четырех последовательно соединенных элементов с вероятностью безотказной работы каждого $P(t)=0,9$ и вероятностью отказа $F(t)=0,1$.

Система без резервирования (рис. 2, а):

$$P_c(t) = P^4(t) = 0,9^4 = 0,66;$$

$$F_c(t) = 1 - P_c(t) = 1 - 0,66 = 0,34$$

Общее постоянное резервирование системы (рис. 2, б):

$$F_{p.c}(t) = F_c^2(t) = 0,34^2 = 0,12$$

$$P_{p.c}(t) = 1 - F_{p.c}(t) = 1 - 0,12 = 0,88.$$

Общее резервирование системы замещением при надежном переключении (рис. 2, в):

$$F_{p.c}(t) = \frac{F_c^2(t)}{2!} = \frac{0,34^2}{2!} = 0,66; \quad P_{p.c}(t) = 1 - F_{p.c}(t) = 1 - \frac{F_c^2(t)}{2!} = 1 - \frac{0,34^2}{2!} = 0,94.$$

Раздельное постоянное резервирование каждого элемента системы (рис. 2, г)

$$P_{p.c}(t) = [1 - F^2(t)]^4 = [1 - 0,1^2]^4 = 0,96$$

$$F_{p.c}(t) = 1 - P_{p.c}(t) = 1 - 0,96 = 0,04$$

Раздельное резервирование замещением каждого элемента системы (рис. 2, д):

$$P_{p.c}(t) = \left[1 - \frac{F_{p.c}^2(t)}{2!} \right]^4 = \left[1 - \frac{0,1^2}{2!} \right]^4 = 0,98$$

$$F_{p.c}(t) = 1 - P_{p.c}(t) = 1 - 0,98 = 0,02$$

Пример наглядно показывает, что резервирование намного эффективнее общего, а резервирование замещением при надежном переключении эффективнее постоянного.

Список литературы

1. Брауде В.И., Семенов Л.Н. Надежность подъемно-транспортных машин 1986. Мягкая обложка. 184с.
2. Кацман М.М., Электрический привод. Издательство: Академия Год: 2011 Страниц: 384с.
3. Ключев В.И., (2001) Теория электропривода: учеб. для вузов.

Нгуен Чонг Хай, асп., tronghai0321@gmail.com, Тула, Тульский государственный университет

IMPROVING THE RELIABILITY OF MATERIAL HANDLING MACHINES

N.T. Hai

The article describes a method for increasing the structural reliability by parallel connection of elements is a structural redundancy. And the article also shows the principle of redundancy in the system recovery in industrial machines.

Key words: backup, reserve, system reliability.

Nguyen Trong Hai, postgraduate, tronghai0321@gmail.com, Tula, Tula State University

УДК 621.646

АНАЛИЗ ПРИЧИН НАРУШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДНОЙ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ

Е.В. Плахотникова, Т.А. Елисеева

В статье, проведен анализ основных причин нарушения работоспособности электроприводной запорной арматуры. Осуществлена систематизация причин путем их расслоения по отказам запорной арматуры и отказам электропривода, а также оценка их значимости на основе метода экспертных оценок.

Ключевые слова: работоспособность, безопасность, надежность, отказ, электроприводная запорная арматура.

Вопросу надежности и безопасности трубопроводной арматуры посвящен ряд исследований [1, 2, 3]. Причиной высокого интереса к обозначенной теме является непосредственная взаимосвязь качества электропри-

водной запорной арматуры и безопасности объектов, на которых она эксплуатируется, среди которых необходимо отметить АЭС, ТЭС и объекты химической промышленности. В связи с такой широкой распространенностью важно поддерживать безопасность арматуры на должном уровне, предвидеть и предупреждать её возможные отказы и их последствия [4].

Согласно статье В.К. Погодина [2], значительное количество аварий и остановов технологических процессов на промышленных предприятиях происходит из-за нарушения работоспособности трубопроводной арматуры (ТА) – невыполнения основных функций: «открытие-закрытие», потеря герметичности в затворе и по отношению к внешней среде и т.д.

Анализ литературы и нормативной документации [5-8], позволяет утверждать, что перечисленные отказы могут быть вызваны целым рядом причин: износом запорной арматуры из-за нарушения условий ее эксплуатации, заложенными на стадии проектирования ошибками, нарушением порядка и условий сервисного обслуживания и т.д.

С целью снижения риска возникновения причин, ведущих к отказам электроприводной запорной арматуры и к потере её работоспособности проведем многофакторный анализ путем выявления и систематизации, наиболее часто встречающихся причин, а также определения их степени критичности.

Для реализации первого этапа анализа – определения номенклатуры наиболее часто встречающихся причин, – был обработан значительный массив статистической информации [5-8], систематизация которой проводилась путем построения древовидной многоуровневой диаграммы (рис.1).

Древовидная диаграмма — инструмент, который позволяет систематически рассматривать предмет (проблему) в виде составляющих элементов (причин) и показывать логические (и являющиеся следствием или продолжением) связи между этими элементами (причинами) [9].

Для построения диаграммы (рис. 1) был использован метод стратификации (расслоения показателей) [10]. Путем стратификации, а затем их последующей систематизации по характерным свойствам была составлена «древовидная диаграмма», определяющая номенклатуру показателей электроприводной запорной арматуры. Расслоение статистических данных производилось по двум основным факторам: критерии отказов и критерии предельных состояний (рис.1 (2-уровень)). Такой подход в дальнейшем позволит разработать конкретные рекомендации по повышению эксплуатационной надежности отдельно для каждого элемента рассматриваемой системы электроприводной запорной арматуры. Критерии отказа - это совокупность признаков, характеризующих неработоспособное состояние изделия [11]. Критерием предельного состояния является совокупность признаков, при которых использование по назначению должно быть прекращено (или невозможно) и изделие должно направляться в капитальный ремонт или списываться (сниматься с эксплуатации) [11].

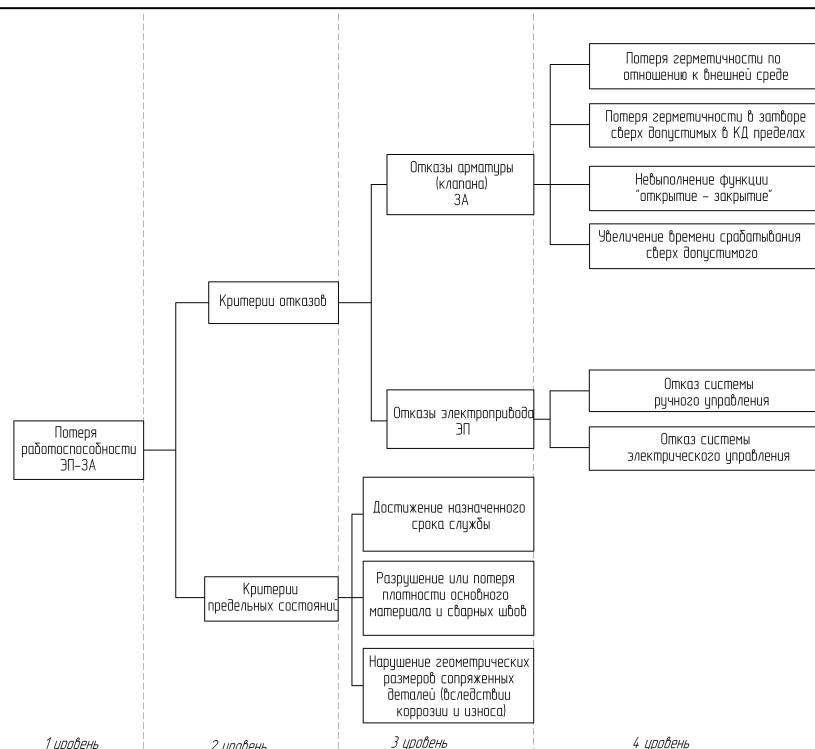


Рис. 1. Деревовидная диаграмма причин отказов электроприводной арматуры

Далее, каждая из основных причин 2-го уровня была детализирована, что в результате позволило получить четырехуровневую систематизированную структуру возможных причин потери работоспособности электроприводной запорной арматуры.

Следующим шагом анализа было определение весомости каждого из выявленных причин 4-го уровня (отказов электропривода и клапана), с целью оценки их критичности, с точки зрения последствий их проявления на объекте эксплуатации.

Для реализации второго этапа анализа был использован метод экспертных оценок, где экспертам было предложено ранжировать отказы электроприводной запорной арматуры по десятибалльной шкале (от 1 до 10) в соответствии с тяжестью их последствий.

Сущность метода экспертных оценок заключается в проведении экспертами интуитивно-логического анализа проблемы с количественной оценкой суждений и последующей обработкой результатов [12]. В настоящее время данный метод широко применяется для решения проблем различного характера, в том числе и для оценки качества продукции.

Для проведения экспертной оценки была сформирована группа экспертов, включившая сотрудников кафедры «Инструментальные и метрологические системы» Тульского государственного университета и представителей предприятия «Сплав-привод» (г. Великий Новгород) и разработа-

ны опросные листы с перечнем основных причин нарушения работоспособности 4-го уровня детализации. Результаты полученных оценок сведены в таблицу (табл. 1).

Проверка согласованности мнений экспертов производится по коэффициенту конкордации [13], рассчитываемому по формуле (1):

$$W = \frac{12 \cdot S}{n^2 \cdot (m^3 - m)}, \quad (1)$$

где S – сумма квадратов отклонений суммы баллов каждого объекта экспертизы от среднеарифметического значения этой же величины; n – число экспертов; m – число объектов экспертизы.

Для данного случая

$$W = \frac{12 \cdot 314}{5^2 \cdot (6^3 - 6)} \approx 0,7.$$

Значимость коэффициента конкордации проверялась по χ^2 распределению [13]. Вычислим наблюдаемое значение критерия χ_n^2 по формуле (2):

$$\chi_n^2 = n \cdot (m - 1) \cdot W \quad (2)$$

$$\chi_n^2 = n \cdot (m - 1) \cdot W = 5 \cdot (6 - 1) \cdot 0,7 = 17,5.$$

Критическое значение $\chi_{кр}^2$ найдем по таблице квантилей χ^2 распределения по заданному уровню значимости $\alpha = 0,05$ и числу степеней свободы $\nu = m - 1$ [13].

$$\chi_{кр}^2 = \chi^2(1 - \alpha; m - 1) = \chi^2(0,95; 5) = 11,07.$$

Так как $\chi_n^2 > \chi_{кр}^2$, то коэффициент конкордации значим, т.е. мнение экспертов по оценке тяжести последствий отказов электроприводной арматуры согласуются с вероятностью 0,95%.

Анализ данных, представленных в таблице (табл.1) позволяет сделать вывод, что наиболее значимыми, с точки зрения тяжести их последствий, являются отказы «увеличение времени срабатывания сверх допустимого», «невыполнение функции открытие - закрытие», «отказ системы электрического управления», таким образом, их устранение необходимо производить в первую очередь.

Третий этап анализа заключался в выявлении причин отказов 4 - го уровня, а также установление взаимосвязей между ними.

Для реализации данного этапа была построена диаграмма сродства (рис. 2).

Таблица 1

Таблица для расчета коэффициента конкордации

Отказы	Ранги по оценкам экспертов					Сумма рангов	Отклонение от средне-арифметического	Квадрат отклонения	Относительное значение весомости каждого отказа, %
	1	2	3	4	5				
Потеря герметичности по отношению к внешней среде	6	5	5	5	5	26	-10	100	12,05
Потеря герметичности в затворе сверх допустимых КД пределах	7	6	6	5	7	31	-5	25	14,35
Невыполнение функции «открытие - закрытие»	8	10	8	8	8	42	6	36	19,44
Увеличение времени срабатывания сверх допустимого	9	10	9	9	8	45	9	81	20,83
Отказ системы ручного управления	6	5	6	6	7	30	-6	36	13,89
Отказ системы электрического управления	8	9	9	8	8	42	6	36	19,44
						$\Sigma 216$		$\Sigma 314$	$\Sigma 100$

Диаграмма сродства предназначена для группирования и упорядочивания большого количества качественных (не числовых) данных. Группирование происходит по принципу родственности информации, которая связана с определенной темой. Каждая группа данных представляет собой группу, выделенную по некоторому признаку, характерному только для этой группы. Данный инструмент качества относится к инструментам управления (к семи новым инструментам качества) и является «творче-

ским» методом. Объединение информации в группы происходит в основном не за счет логической связи между этой информацией, а скорее за счет ассоциаций [14].

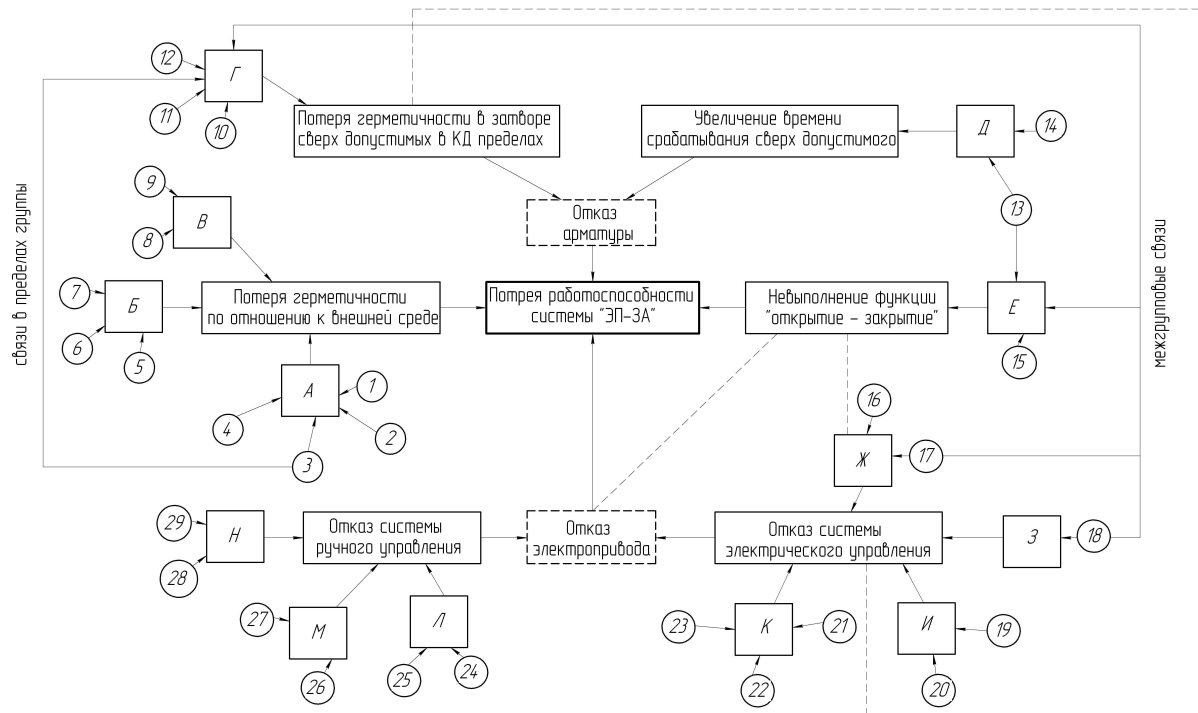


Рис. 2. Диаграмма родства для системы «электропривод – запорная арматура»

Построение диаграммы (рис.2) позволило систематизировать информацию о причинах отказов 4 - го уровня системы электроприводной запорной арматуры, выделенного ранее. На рисунке 2 данные причины обозначены прописными буквами русского алфавита, цифрами, обозначены причины их вызывающие (табл.2), штриховыми линиями показана взаимосвязь между отказами, находящимися в разных категориях. Данная диаграмма позволила установить отказы, взаимно провоцирующие друг друга. Например, отказы «невыполнение функции «открытие закрытие» и «увеличение времени срабатывания сверх допустимого» связывает общая причина – «повреждение резьбы винтовой пары», а «отказ системы электрического управления» электропривода связан межгрупповыми связями с отказом арматуры «невыполнение функции «открытие закрытие» (наличие общей причины – недостаточный крутящий момент). Если два параметра связаны между собой, значит изменение одного, повлечет за собой изменение другого. В дальнейшем причинам, которые ведут к совокупным отказам необходимо уделить особое внимание. Подробное изучение данных причин, разработка корректирующих действий и мероприятий по их устранению позволит уменьшить количество отказов и повысить работоспособность не отдельно взятых элементов, а всей системы электроприводной

запорной арматуры.

Таблица 2

Пояснение к рисунку 2

Обозначение	Описание
А	Потеря герметичности корпусных деталей и сварных соединений
Б	Потеря герметичности неподвижных соединений
В	Потеря герметичности подвижных соединений
Г	Пропуск среды при закрытом запорном органе (через седло)
Д	Перемещение запорного органа с задержками
Е	Полное отсутствие перемещения запорного органа
Ж	Электропривод не обеспечивает достаточного усилия для герметичного перекрытия арматуры
З	При пуске электродвигателя арматура не открывается
И	При нажатии на пусковые кнопки двигатель вращается вхолостую, а электропривод стоит
К	При нажатии на пусковые кнопки электродвигатель не вращается
Л	При работе ручного дублера стрелка указателя положения запорной арматуры не вращается
М	Усилие на маховике возрастает настолько, что невозможно открыть или закрыть арматуру
Н	При переключении привода на ручное управление маховик вращается вхолостую
1	Наличие трещин, пустот, свищей
2	Коробление корпуса в местах присоединения к трубопроводу
3	Повреждение уплотнительных поверхностей корпуса и крышки
4	Нарушение технологии изготовления сварного шва или его повреждение
5	Износ прокладок
6	Недостаточная затяжка шпилечного соединения
7	Повреждение уплотнительных поверхностей корпуса, крышки, фланца
8	Износ сальника
9	Повреждение поверхности шпинделя
10	Повреждение запорного органа
11	Попадание твердых частиц между уплотнительными поверхностями затвора
12	Приложено слишком малое усилие на маховике

Обозначение	Описание
13	Повреждение резьбы винтовой пары
14	Скопление твердого осадка на поверхности направляющих
15	Ржавчина, долгие простои
16	Не точно настроены конечные микровыключатели
17	Недостаточный крутящий момент в сторону закрытия
18	Недостаточный крутящий момент в сторону открытия
19	Срезана шпонка на червяке или на валу электродвигателя
20	Электропривод не переключен на электрическое управление
21	Нет напряжения на щите управления
22	Не работает пускатель
23	Неисправна силовая цепь
24	Ослаб винт, стопорящий диск со стрелкой
25	Неисправность передачи от приводного вала привода к валу путевого выключателя
26	Заедание подвижных частей электропривода
27	Заедание подвижных частей арматуры
28	Сорвана шпонка на шлицевом валу или маховике
29	Кулачки муфт не сцепляются или сломаны

В результате проведенного анализа основных причин нарушения работоспособности электроприводной запорной арматуры можно сделать следующие выводы:

наиболее важными с точки зрения тяжести последствий являются отказы «увеличение времени срабатывания сверх допустимого», «невыполнение функции открытие - закрытие», «отказ системы электрического управления», именно для их устранения должны быть разработаны корректирующие мероприятия в первую очередь, что в максимальной степени за незначительный период времени позволит снизить риск потери работоспособности системы электроприводной запорной арматуры;

разработка диаграммы сродства позволила установить взаимосвязи между отказами 4 уровня, причинам их возникновения, а также выявить отказы, взаимно провоцирующие друг друга. Очевидно, что воздействие на данные причины с целью их устранения, так же позволит снизить потери работоспособности электроприводной запорной арматуры;

устранение причин, объединяющих межфункциональными связями отказы электропривода и отказы запорной арматуры, позволит в дальнейшем более эффективно разработать мероприятия и корректирующие действия по их устранению.

Список литературы

1. Тарасьев Ю.И., Токмаков О.А. Пути обеспечения безопасности арматуры // Мир арматуры: журн. №3 (60) 2009. СПб, 2009. С.16-22.
2. Погодин В.К. Концепция обеспечения безопасной эксплуатации трубопроводной арматуры на промышленных предприятиях // Арматуростроение: журн. №1 (40) 2006. С. 24-37.
3. Тарасьев Ю.И., Дунаевский С.Н. Вопросы надежности и безопасности трубопроводной арматуры // территория нефтегаз: журн. №9, 2008. С. 64-69.
4. Елисеева Т.А. Анализ безопасности электроприводной запорной арматуры методом АВПКО // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 5. Тула: ТулГУ. 2013. С. 182-186.
5. Кинжер А.Х. Ремонт трубопроводной арматуры электростанций: учебное пособие. М.: Высш. Школа, 1986. 144 с.
6. Гуревич Д.Ф. Трубопроводная арматура: справочное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Машиностроение, 1981. 368 с.
7. НП-068-05. Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования; введ. 2006-05-01. М.: РОСТЕХНАДЗОР, 2006. 59 с.
8. ГОСТ 5762-2002. Арматура трубопроводная промышленная. Задвижки на номинальное давление не более PN 250. Общие технические условия; введ. 2003-07-01. М.: Изд-во стандартов, 2003. 20 с.
9. Глудкин О.П., Горбунов Н.М., Гуров А.И. Всеобщее управление качеством: учебник для вузов, М.: Горячая линия. Телеком, 2001. 600 с.
10. Шишкин И.Ф. Метрология, стандартизация и управление качеством. М.: Изд-во стандартов, 1990. 324 с.
11. РД 26.260.004-91 Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации; введ. 1992-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1992.
12. Орлов А.И. Экспертные оценки: учеб. пособие. М.: ИВСТЭ, 2002. 230 с.
13. Басовский Л.Е., Протасьев В.Б. Управление качеством: учеб. для вузов. М.: ИНФРА-М, 2007. 212с.
14. Менеджмент качества. Диаграмма сродства. http://www.kpms.ru/Implement/Qms_Affinity_Diagram.htm (дата обращения 9.12.2013).

Плахотникова Елена Владимировна, канд. техн. наук, доц.,
e_plahotnikova@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Елисеева Татьяна Алексеевна, асп., eliseeva_tatiana@mail.ru, Россия, Тула,
Тульский государственный университет

E.V. Plahotnikova, T.A. Eliseeva

The article analyzes the main causes of abnormal operation, valves. Carried out by their systematization reasons bundle on failures of valves and actuator failures, as well as assessment of their significance on the basis of expert assessments.

Key words: performance, security, reliability, failure, motorized stop valves.

Plahotnikova Elena Vladimirovna, candidate of technical science, docent, e_plahotnikova@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University.

Eliseeva Tatiana Alexeevna, postgraduate, eliseeva_tatiana@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University.

УДК 622.014

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОБДЕЛОК КОЛЛЕКТОРНЫХ ТОННЕЛЕЙ, ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ БЕСТРАНШЕЙНЫМ СПОСОБОМ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

А.С. Саммаль, О.М. Левищева, Н.Н. Фотиева

Предлагается новый аналитический метод оценки напряженного состояния обделок коллекторных тоннелей, создаваемых в ходе восстановительного ремонта методом «труба в трубе», с учетом влияния зданий и сооружений на поверхности. В основу разработанного метода положено соответствующее решение плоской задачи теории упругости для полубесконечной весомой среды, ослабленной круговым отверстием, подкрепленным трехслойным кольцом со слоями переменной толщины. Рассмотрен конкретный пример, иллюстрирующий предлагаемый метод.

Ключевые слова: обделка, коллекторный тоннель, расчет, напряженное состояние, плоская задача, аналитические функции, алгоритм, компьютерная программа

Неотъемлемой частью подземной инфраструктуры крупных городов являются коллекторные тоннели, эффективное функционирование которых определяет успешную работу городских коммунальных систем. В тоже время в результате газовой коррозии и истирающего действия абразивных частиц стоков, происходит локальное уменьшение толщины обделок таких сооружений и снижение несущей способности конструкций в целом. Предотвратить аварии на коллекторах и увеличить срок службы канализационных систем возможно с помощью проведения своевременного восстано-

вительного ремонта методом «труба в трубе», который предусматривает протяжку внутри тоннелей полиэтиленовых труб (ПЭ) с заполнением пространства между новой трубой и существующей обделкой специальным тампонажным раствором. Данная технология позволяет проводить ремонтные работы без перекрытия стоков и извлечения существующих подземных конструкций при минимуме земляных работ и полной сохранности инфраструктуры на поверхности, что имеет большое значение в городских условиях. В результате ремонта в тоннеле создается фактически новая обделка, которая представляет собой трехслойную конструкцию, несущая способность которой зависит не только от степени изношенности старой обделки, но и от механических и деформационных характеристик новых конструктивных элементов.

Следует отметить, что на сегодняшний день не существует научно-обоснованных методов оценки напряженного состояния и несущей способности реконструированных коллекторных тоннелей, и, следовательно, геомеханическая проблема оценки эффективности восстановления таких сооружений остается весьма актуальной.

В Тульском государственном университете в течение ряда лет проводятся научные исследования, связанные с разработкой нового аналитического метода оценки напряженного состояния обделок коллекторных тоннелей, восстанавливаемых бестраншейным способом, в условиях городской застройки.

В основу предлагаемого метода положено аналитическое решение плоской задачи теории упругости для трехслойного кольца, моделирующего восстановленную обделку коллекторного тоннеля, подкрепляющего отверстие в линейно-деформируемой полубесконечной среде, моделирующей массив грунта (пород). Общая расчетная схема приведена на рис. 1.

Полубесконечная среда S_0 , моделирующая массив пород с деформационными характеристиками – модулем деформации E_0 и коэффициентом Пуассона ν_0 , ограничена прямой L'_0 и отверстием, подкрепленным кольцом, состоящим из трех слоев S_j ($j = 1, \dots, 3$), моделирующим восстановленную обделку коллекторного тоннеля. При этом слои S_1 и S_2 , моделирующие старую обделку тоннеля, подвергшуюся коррозионному повреждению, и тампонажный слой бетона соответственно, имеют переменные толщины и выполнены из материалов с различными деформационными характеристиками E_j, ν_j ($j=1, 2$). Внутренний слой S_3 , моделирующий внутреннюю трубу ПЭ, с деформационными характеристиками E_3, ν_3 , ограничен наружным и внутренним радиусами R_2 и R_3 соответственно. При этом центр области S_3 , смещен относительно оси выработки (начала координат) по оси ординат на величину a .

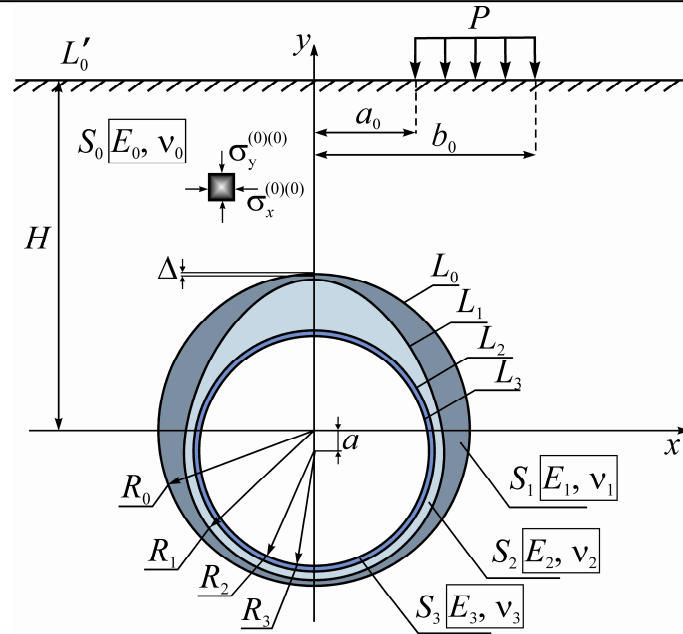


Рис. 1. Общая расчетная схема

Слои кольца S_j ($j=1, 2, 3$) и среда S_0 деформируются совместно, т.е. на линиях контакта L_j ($j=0, 1, 2$) выполняются условия непрерывности векторов смещение и полных напряжений.

Действие собственного веса грунта моделируется наличием в области S_0 поля начальных напряжений, линейно изменяющихся по высоте, определяемых формулами:

$$\sigma_x^{(0)(0)} = -\lambda\gamma(H-y)\alpha^*, \quad \sigma_y^{(0)(0)} = -\gamma(H-y)\alpha^*, \quad \tau_{xy}^{(0)(0)} = 0, \quad (1)$$

где γ – удельный вес грунта, H – глубина заложения выработки, λ – коэффициент бокового давления грунта в ненарушенном массиве, α^* – корректирующий множитель, введенный для учета особенностей формирования напряженного состояния восстанавливаемой обделки, определяемый на основе данных натурных наблюдений.

На границе полуплоскости L'_0 также выполняются условия отсутствия внешних сил, либо, при моделировании веса зданий и сооружений на поверхности, рассматривается действие на произвольном ее участке $a_0 \leq x \leq b_0$ равномерно распределенной нагрузки интенсивностью P . При этом предлагаемый метод позволяет рассматривать два случая, когда нагрузка была приложена до ремонта тоннеля и после восстановления обделки.

Решение поставленной задачи получено с использованием теории аналитических функций комплексного переменного, аппарата конформного отображения и аналитического продолжения функций через незагруженный участок границы нижней полуплоскости в верхнюю полуплоскость, а также свойств комплексных рядов Лорана и Фабера [1,2].

Полученное решение реализовано в форме полного алгоритма, на базе которого разработано соответствующее компьютерное программное обеспечение, позволяющее производить эффективные многовариантные расчеты.

Ниже в качестве иллюстрации приводятся результаты определения напряженного состояния восстановленной обделки коллекторного тоннеля при действии распределенной нагрузки на поверхности, моделирующей вес здания или сооружения. Рассматривается случай приложения нагрузки после окончания ремонтных работ, в результате которых создается трехслойная конструкция обделки тоннеля.

Принимается, что вследствие газовой коррозии бетона, а также абразивного действия частиц, находящихся в стоках, внутренний контур обделки, существовавшей до ремонта, имеет форму отличную от круговой: в своде толщина бетона составляет 0,06 м и в лотке 0,07 м. В процессе восстановительного ремонта внутри старой обделки прокладывается полиэтиленовая труба «Спиролайн» при этом пространство между внутренней трубой и существовавшей ранее подземной конструкцией заполняется цементным раствором.

При расчете принимались следующие исходные данные: геометрические параметры обделки $R_0=1$ м; $R_2=0,8$ м; $R_3=0,705$ м; деформационные характеристики грунта и слоев обделки соответственно $E_0=50$ МПа; $\nu_0=0,35$; $E_1=20\,000$ МПа; $\nu_1=0,2$; $E_2=10\,000$ МПа; $\nu_2=0,2$; $E_3=400$ МПа; $\nu_3=0,4$; интенсивность нагрузки на поверхности $P=1$ МПа, распределенной на участке с координатами $a_0=10$ м, $b_0=0$ м; центр внутренней трубы смещен вниз по оси ординат на величину $a=-0,1$ м; глубина заложения тоннеля $H=5$ метров.

Ниже приводятся расчетные эпюры нормальных тангенциальных напряжений (в долях величины нагрузки P) на внутренних $\sigma_{\theta}^{(in)}/P$ и наружных $\sigma_{\theta}^{(ex)}/P$ контурах слоев подземной конструкции соответственно: в старой обделке (рис. 2), в тампонажном слое (рис. 3) и во внутренней трубе ПЭ (рис. 4).

Из приведенных результатов следует, что повреждения старой обделки, обусловленные газовой коррозией бетона и истиранием лотка, оказывают существенное влияние на распределение нормальных тангенциальных напряжений, как в ней самой, так и в дополнительном тампонажном слое. При этом в рассмотренном случае наиболее нагруженным оказывается внешний слой обделки, существовавший до проведения ремонта. Данное обстоятельство, которое может оказаться весьма существенным в других горно-геологических условиях и при применении материалов с другими механическими свойствами, необходимо учитывать при проекти-

ровании восстановительного ремонта коллекторных тоннелей бестраншейным способом.

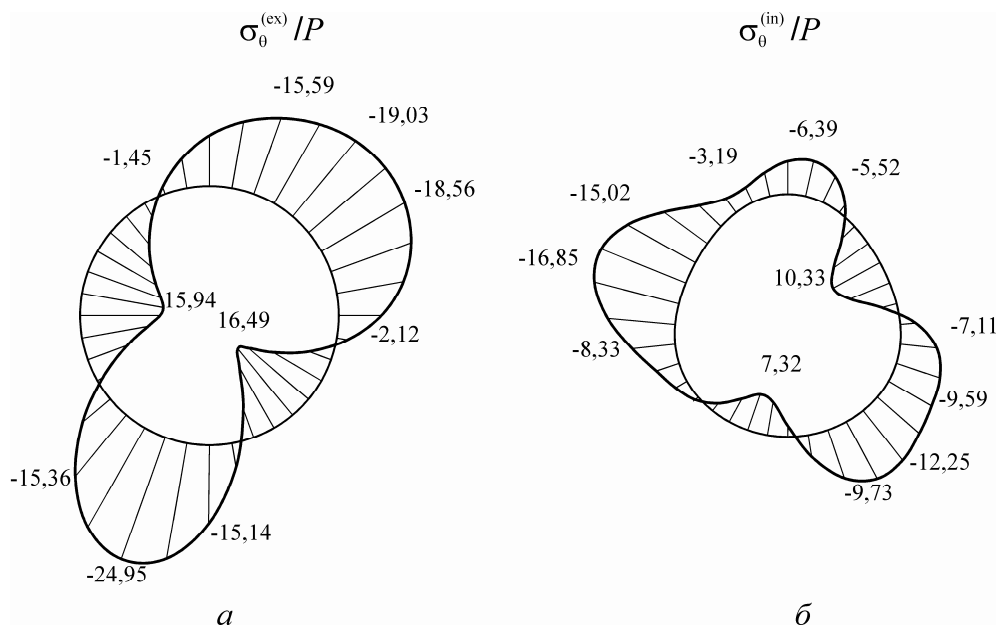


Рис. 2 Расчетные эпюры нормальных тангенциальных напряжений, возникающих на контурах существовавшей до ремонта бетонной обделки (а – на внешнем, б – на внутреннем)

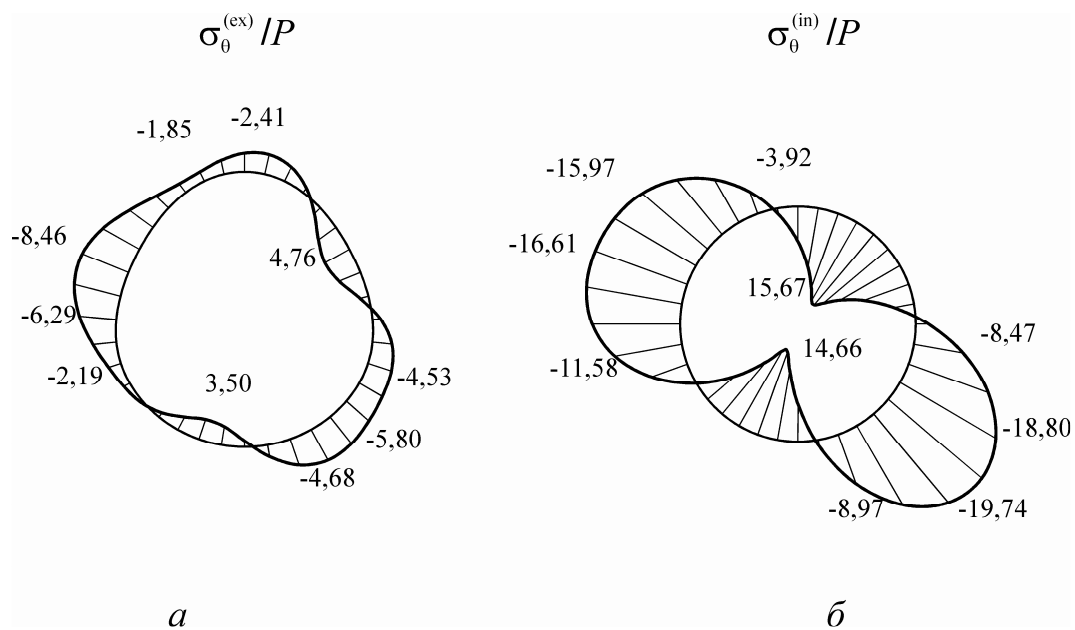


Рис. 3 Расчетные эпюры нормальных тангенциальных напряжений, возникающих на контурах тампонажного слоя обделки (а – на внешнем, б – на внутреннем)

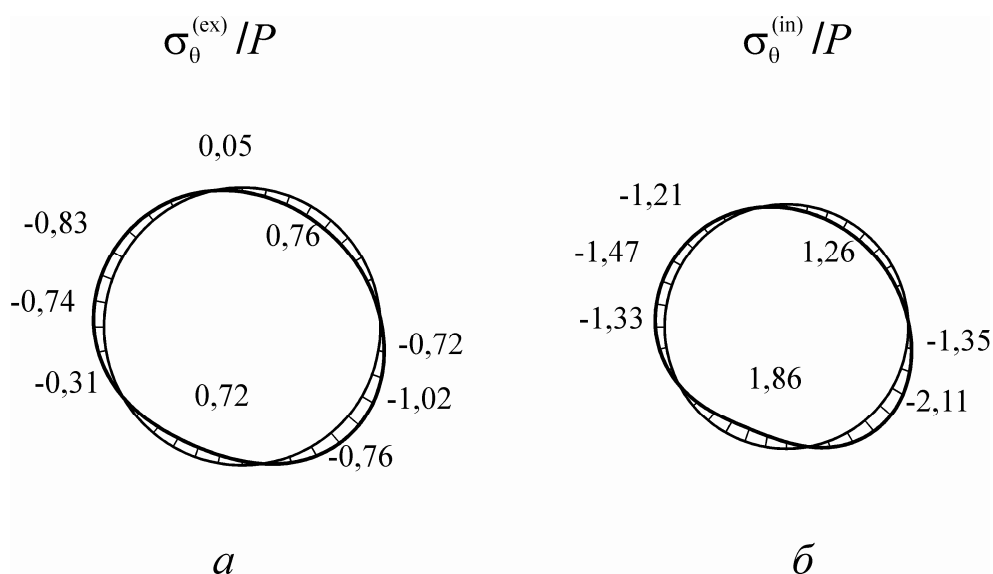


Рис. 4 Расчетные эпюры нормальных тангенциальных напряжений возникающих на контурах трубы ПЭ (а – на внешнем, б – на внутреннем)

В заключение отметим, что найденные напряжения в соответствии с принципом суперпозиции должны быть просуммированы с результатами расчета на другие виды воздействий (в самых неблагоприятных сочетаниях), после чего может быть произведена оценка несущей способности обделки.

Список литературы

1. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости /Н.И. Мусхелишвили. М.: Наука, 1966. 708 с.
4. Фотиева Н.Н., Саммаль Т.Г. Прогноз снижения несущей способности обделки кругового тоннеля вследствие локального уменьшения ее толщины, обусловленного коррозией бетона //Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте. Сб. трудов IV Междунар. конф. 29-30 июня 1999 г. С.-Петербург, 1999. С. 197 – 201.

Саммаль Андрей Сергеевич, д-р техн. наук, проф., assammal@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Левичева Оксана Михайловна, асп., levischeva-garant@yandex.ru Россия, Тула, Тульский государственный университет.

Фотиева Нина Наумовна, д-р техн. наук, проф., fotieva@mm.tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

STRESS STATE ESTIMATION OF SEWER TUNNEL LININGS REPAIRED
IN URBAN AREAS BY TRENCHLESS TECHNOLOGY

A.S. Sammal, O.M. Levischeva, N.N. Fotieva

A new analytical method for estimation of the stress state of sewer tunnels lining formed during repairing works by "pipe in pipe" technology, taking into account the influence of buildings and structures on the surface, is proposed. The method is based on the analytical solution of the corresponding plane elasticity problem for a semi-infinite weighty media weakened by a circular opening, supported by a three-layer ring with layers of varying thickness. The example illustrating the proposed method is considered.

Key words: lining, sewer tunnel, estimation, stress state, elasticity theory problem, analytic functions, algorithm, computer software.

Sammal Andrey Sergeevich, doctor of technical Sciences, professor, assam-mal@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

Levischeva Oksana Mikhailovna, postgraduat, levischeva-garant@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

Fotieva Nina Naumovna, doctor of technical Sciences, professor, fotitva@mm.tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.421.2:519.178

**ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМА ПОИСКА КРАТЧАЙШЕГО ПУТИ
НА РАСШИРЕННОМ ГРАФЕ**

К.Т. Фам, В.Х. Нгуен

Составлено описание расширенного графа и задачи поиска кратчайшего пути на него. Разработаны алгоритмы поиска кратчайшего пути между двумя вершинами в расширенном графе и поиска кратчайшего пути из одной вершины к вершинам в расширенном графе. Выдвинуты две теоремы с доказательствами об алгоритме поиска кратчайшего пути и сложности алгоритма.

Ключевые слова: расширенный граф, ориентированный граф, неориентированный граф, поиск кратчайшего пути.

Графом является полезный математический инструмент во многих прикладных областях, таких как транспорт, телекоммуникации, информационные технологии, экономика. До сих пор, в графе рассматриваются только веса ребер и вершин независимо друг от друга. В графе длина пути рассчитывается как сумма общих весов ребер и вершин по путям. Одна-

ко существует много проблем например: вес на одной вершине не совпадает с путями до вершины, пути проходящие через вершину также зависят от приходящих и уходящих ребер. Поэтому мы должны построить модель расширенного графа, чтобы распространить модели реальных проблем более точно и эффективно.

Пусть смешанный граф $G=(V, E)$, состоящий из двух конечных множеств [1,2]: V - множество вершин и множество пар элементов из V , т.е.

$E: V \times V$ – множество ребер, если пары неупорядочены, и множество дуг, если пары упорядочены. В первом случае граф $G(V,E)$ называется неориентированным, во втором ориентированным [3,4].

Каждому ребру $e \in E$ присваивается вес $w_E(e)$. При каждой вершине $v \in V$, обозначение E_v является множеством ребер вершины v . Каждой вершине $v \in V$ и каждой паре ребер $(e, e') \in E_v \times E_v$, $e \neq e'$ присваивается вес $w_V(v, e, e')$ [5].

Набор $G = (V, E, w_E, w_V)$ является *расширенным графом*.

Пусть p - путь из вершины u в вершину v через ребра e_i , $i = 1, \dots, h+1$, и вершины u_i , $i = 1, \dots, h$, как представлено ниже:

$$p = [u, e_1, u_1, e_2, u_2, \dots, e_h, u_h, e_{h+1}, v]$$

Длина пути p обозначается $l(p)$, и определяется следующим образом (1):

$$l(p) = \sum_{i=1}^{h+1} w_E(e_i) + \sum_{i=1}^h w_V(u_i, e_i, e_{i+1}) \quad (1)$$

Задача поиска кратчайшего пути:

Пусть расширенный граф $G = (V, E, w_E, w_V)$ и вершины $s, t \in V$. Найти кратчайший путь от s до t [6].

Алгоритм поиска кратчайшего пути между двумя вершинами в расширенном графе

Вход: расширенный граф $G = (V, E, w_E, w_V)$ и вершины $s, t \in V$

Выход: $l(t)$ длина кратчайшего пути от s до v если $l(t) < +\infty$.

Обозначим:

S – множество вершин, найденных в кратчайшем пути от s ; $T = V - S$;

$l(v)$ - длина кратчайшего пути от s до v ;

$le(v)$ - ребро в вершину v на кратчайший путь от s до v ;

$VE = \{(v, e) | v \in V \setminus \{s\} \ \& \ e \in E_v\} \cup \{(s, \emptyset)\}$ – множество пар вершин и ребер взаимозависимостью;

SE – множество пар вершин и ребер были исключены от VE ;
 $TE = VE - SE$;

$L(v, e)$ - пара вершин и ребер $(v, e) \in VE$;

$P(v, e)$ - пара передних вершин и ребер $(v, e) \in VE$.

Рассмотрим 5 шагов алгоритма поиска кратчайшего пути между двумя вершинами в расширенном графе:

Шаг 1: (инициализация):

Начало. Пусть $S = \emptyset$; $T = V$, $VE = \{(v,e) \mid v \in V \setminus \{s\} \ \& \ e \in E_v\} \cup \{(s,\emptyset)\}$; $SE = \emptyset$, $TE = VE$;

Назначать $L(v,e) = +\infty$, $\forall (v,e) \in VE$, $L(s,\emptyset) = 0$, $P(v,e) = \emptyset$, $\forall (v,e) \in VE$.

Шаг 2:

Определить $m = \min\{L(v,e) \mid (v,e) \in TE\}$.

Если $m = +\infty$, вывод: не присутствует путь от s до v . *Наконец.*

Наоборот, если $m < +\infty$, выбор $(v_{min}, e_{min}) \in TE$, таким образом $L(v_{min}, e_{min}) = m$, приводит к $TE = TE - \{(v_{min}, e_{min})\}$, $SE = SE \cup \{(v_{min}, e_{min})\}$, и переход к шагу 3.

Шаг 3:

Если $v_{min} \notin S$, то $le(v_{min}) = e_{min}$, $S = S \cup \{v_{min}\}$, $l(v_{min}) = L(v_{min}, e_{min})$, $T = T - \{v_{min}\}$.

Если $t = v_{min}$, переход к шагу 5, наоборот, если $t \neq v_{min}$, переход к шагу 4

Шаг 4:

С каждой пары $(v,e) \in TE$ соседних возвращают назад (v_{min}, e_{min}) , пусть

$L'(v,e) = L(v_{min}, e_{min}) + w_E(v_{min}, v) + w_V(v_{min}, e_{min}, e)$, если $v_{min} \neq s$ и $L'(v,e) = L(s, \emptyset) + w_E(v_{min}, v)$, если $v_{min} = s$.

Если $L(v,e) > L'(v,e)$, то $L(v,e) = L'(v,e)$ и $P(v,e) = (v_{min}, e_{min})$.

Вернуться к шагу 2.

Шаг 5: (поиск кратчайшего пути)

Обозначим $l(t) = L(t, le(t))$ как длину кратчайшего пути от s до t . От t вернёмся в предыдущую пару вершин и ребер, получим следующий кратчайший путь (2):

$$(v_1, e_1) = P(t, le(t)), (v_2, e_2) = P(v_1, e_1), \dots, (v_k, e_k) = P(v_{k-1}, e_{k-1}), (s, \emptyset) = P(v_k, e_k), \quad (2)$$

Поэтому кратчайший путь $s \rightarrow v_k \rightarrow v_{k-1} \rightarrow \dots \rightarrow v_1 \rightarrow t$. Конец.

Теорема 1: Алгоритм поиска кратчайшего пути в расширенном графе верен.

Доказательство: Обозначим пары вершин – ребер с очередью в P (3):

$$(v_0, e_0) = (s, \emptyset), (v_1, e_1), \dots, (v_m, e_m) = (t, le(t)). \quad (3)$$

Докажем по индукции, что $L(v_i, e_i)$ – это длина кратчайшего пути от s до v_i , через e_i , $i=1, \dots, m$.

Основа: очевидно, что $L(v_1, e_1)$ это длина кратчайшего пути от s до v_1 , через ребро e_1 . Это длина кратчайшего пути от s до v_1 , т.е. $l(v_1) = L(v_1, e_1)$, так как v_1 теперь введен в P .

Индукция: Пусть $L(v_i, e_i)$ является длиной кратчайшего пути от s до v_i через ребро e_i при всех $i < k$. Докажем, что $L(v_k, e_k)$ – это длина кратчайшего пути от s до v_k через ребро e_k . p является кратчайшим путем от s до v_k через e_k , $l(p)$ является длина p . Пары вершин-ребер на p -стороне, за исключением (v_k, e_k) , в наборе:

$$SE' = \{(v_1, e_1), (v_2, e_2), \dots, (v_{k-1}, e_{k-1})\}.$$

Действительно, пусть, наоборот, (v, e) является первой парой вершин-ребер на p -стороне от s , и не присутствует на SE' . Тогда $(v_i, e_i) \in SE'$ вершина-ребро на p перед (v, e) . Получим:

$$L(v, e) \leq L(v_i, e_i) + w_E(v_i, v) + w_V(v, e_i, e) < l(p) \leq L(v_k, e_k),$$

из этого следует, что (v, e) должна входить в SE перед v_k , т.е. $(v, e) \in SE$, но это противоречиво.

Теперь, (v_h, e_h) вершина-ребро перед (v_k, e_k) на p . Так как, получим (4):

$$L(v_k, e_k) \leq L(v_h, e_h) + w(v_h, v_k) + w_V(v_h, e_h, e_k) = l(p). \quad (4)$$

Поэтому $L(v_k, e_k) = l(p)$ – длина кратчайшего пути p от s до e_k через e_k .

Наконец, потому что $(t, le(t))$ – вершина-ребро содержат вершину t на первом входе в SE , поэтому $l(t) = L(t, le(t))$ – это длина кратчайшего пути от s до t .

Теорема 2: Пусть расширенный граф G при n вершинах и m ребрах, тогда получим сложность алгоритма $O(n^3)$.

Доказательство: Ребра каждой вершины не более $(n-1)$, поэтому множество VE должно содержать мощность не более $n(n-1)$. С каждым циклом, начиная с шага 2 до шага 4 выберем пару вершин-ребер, принадлежащих VE , которая поставлена в SE , цикл не должен превышать $n(n-1)$. На каждой итерации алгоритма обследуются $(n-1)$ пар вершин-ребер, которые считаются в шаге 4. Так как сложность алгоритма $O(n^3)$.

Алгоритм поиска кратчайшего пути из одной вершины к вершинам в расширенном графе

Вход: расширенный граф $G = (V, E, w_E, w_V)$, вершина $s \in V$ и множество $U \subset V$.

Выход: $l(v)$ это длина кратчайшего пути от s до v и кратчайший путь, если $(l(v) < +\infty)$, $\forall v \in U$.

Пусть SU – вершин на U , найденных кратчайшим путем от s ; $TU = U - SU$;

Рассмотрим 5 шагов алгоритма поиска кратчайшего пути из одной вершины к вершинам в расширенном графе:

Шаг 1 (инициализация): Начало. $S = \emptyset$; $T = V$; $TU = U$; $SU = \emptyset$;

$VE = \{(v, e) | v \in V \setminus \{s\} \ \& \ e \in E_v\} \cup \{(s, \emptyset)\}$; $SE = \emptyset$, $TE = VE$;

$L(v, e) = +\infty$, $\forall (v, e) \in VE$, $L(s, \emptyset) = 0$;

$P(v, e) = \emptyset$, $\forall (v, e) \in VE$.

Шаг 2: Определить $m = \min\{L(v,e) \mid (v,e) \in TE\}$.

Если $m = +\infty$, переход шагу 5.

Наоборот, если $m < +\infty$, выбор $(v_{min}, e_{min}) \in TE$, таким образом $L(v_{min}, e_{min}) = m$, приводит к $TE = TE - \{(v_{min}, e_{min})\}$, $SE = SE \cup \{(v_{min}, e_{min})\}$, и переход к шагу 3.

Шаг 3: Если $v_{min} \notin S$, то

$le(v_{min}) = e_{min}$, $S = S \cup \{v_{min}\}$, $l(v_{min}) = L(v_{min}, e_{min})$, $T = T - \{v_{min}\}$,

Если $v_{min} \in TU$, то $SU = SU \cup \{v_{min}\}$ và $TU = TU - \{v_{min}\}$.

Если $TU = \emptyset$, то переход к шагу 5, наоборот, если $TU \neq \emptyset$, переход к шагу 4.

Шаг 4: С каждой пары $(v,e) \in TE$, соседних возвращают назад (v_{min}, e_{min}) , пусть

$L'(v,e) = L(v_{min}, e_{min}) + w_E(v_{min}, v) + w_V(v_{min}, e_{min}, e)$, если $v_{min} \neq s$

и $L'(v,e) = L(s, \emptyset) + w_E(e, v)$, если $v_{min} = s$.

Если $L(v,e) > L'(v,e)$, то $L(v,e) = L'(v,e)$ и $P(v,e) = (v_{min}, e_{min})$.

Вернуться в шаг 2.

Шаг 5: (поиск кратчайшего пути)

С каждой вершиной $t \in SU$, назовем $l(t) = L(t, le(t))$ – длина кратчайшего пути от s до t . От t вернемся в предыдущую пару вершин – ребер, получим кратчайший путь следующим (5):

$(v_1, e_1) = P(t, le(t))$, $(v_2, e_2) = P(v_1, e_1)$, ..., $(v_k, e_k) = P(v_{k-1}, e_{k-1})$, $(s, \emptyset) = P(v_k, e_k)$. (5)

Поэтому кратчайший путь: $s \rightarrow v_k \rightarrow v_{k-1} \rightarrow \dots \rightarrow v_1 \rightarrow t$. Конец.

Список литературы

1. Зыков А.А. Основы теории графов. М.:Наука, 1987, 384 с.
2. Татт У. Теория графов. Пер. с англ. М.:Мир, 1988, 424 с.
3. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. Пер. с англ. М.:Мир, 1978, 432 с.
4. Russell Merris, Graph Theory // John Wiley & Sons, 2011, 256 с
5. Diestel R. Graph Theory - Springer, 2005, 410 pages.
6. Giáo Trình Lý Thuyết Đồ Thị, Nguyễn Thanh Hùng. Nguyễn Đức Nghĩa// Nxb Đại học Quốc gia TP HCM, 168с.

Фам Конг Тханг, аспирант, racotha@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Нгуен Ван Хьеу, канд. техн. наук, nvhieuqt@dut.udn.vn Вьетнам, Дананг, Университет Дананга, университет наук и технологии

CONSTRUCT AN ALGORITHM FOR FINDING THE SHORTEST PATH ON THE
EXTENDED GRAPH

Pham Cong Thang, Nguyen Van Hieu

A description of the expanded graph and find the shortest path problem on it compiled. The algorithms find the shortest path between two vertices in the expanded graph and find the shortest path from one vertex to the vertices in the expanded graph. Forward two theorems with proof-search algorithm for the shortest path algorithm and his complexity.

Key words: directed and undirected graph , find the shortest pat, an expanded graph.

Pham Cong Thang, post graduate, pacotha@gmail.com , Russia, Tula, Tula State University.

Nguyen Van Hieu, candidate of technical science, nvhieuqt@gmail.com, VietNam, Da Nang , The University of Danang, University of Science and Technology

ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК. 621.7, 539.3

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МАТЕРИАЛА ПРИ РЕДУЦИРОВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СТАКАНА ПУАНСОНОМ С ПРОДОЛЬНЫМИ ПАЗАМИ

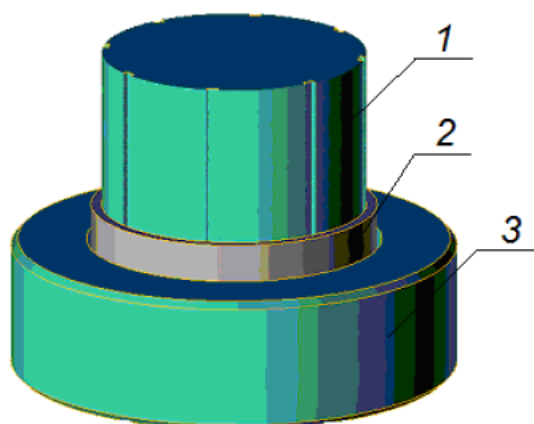
О.Н. Митин, В.Д. Кухарь, А.Е. Киреева

В статье приведен анализ напряженно-деформированного состояния материала в стенке цилиндрической заготовки при ее редуцировании пуансоном с продольными пазами через гладкую коническую матрицу. Приведены результаты, характеризующие изменение гидростатического напряжения, интенсивности напряжений, компонент деформаций и температур, возникающих изменение в стенке стакана в процессе его редуцирования.

Ключевые слова: математическое моделирование, продольные пазы, пуансон, матрица, редуцирование, рифт.

Проанализируем основные характеристики напряженно-деформированного состояния материала в процессе редуцирования (рис.1) цилиндрического стакана пуансоном с продольными пазами.

Процесс нагружения заготовки разбивался на четыре этапа (рис.2). Математическое моделирование процесса формирования продольных прямоугольных выпуклых рифтов на внутренней поверхности стакана проводилось с помощью программного комплекса QForm 2D/3D [1].



**Рис. 1. Схема процесса редуцирования:
1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица**

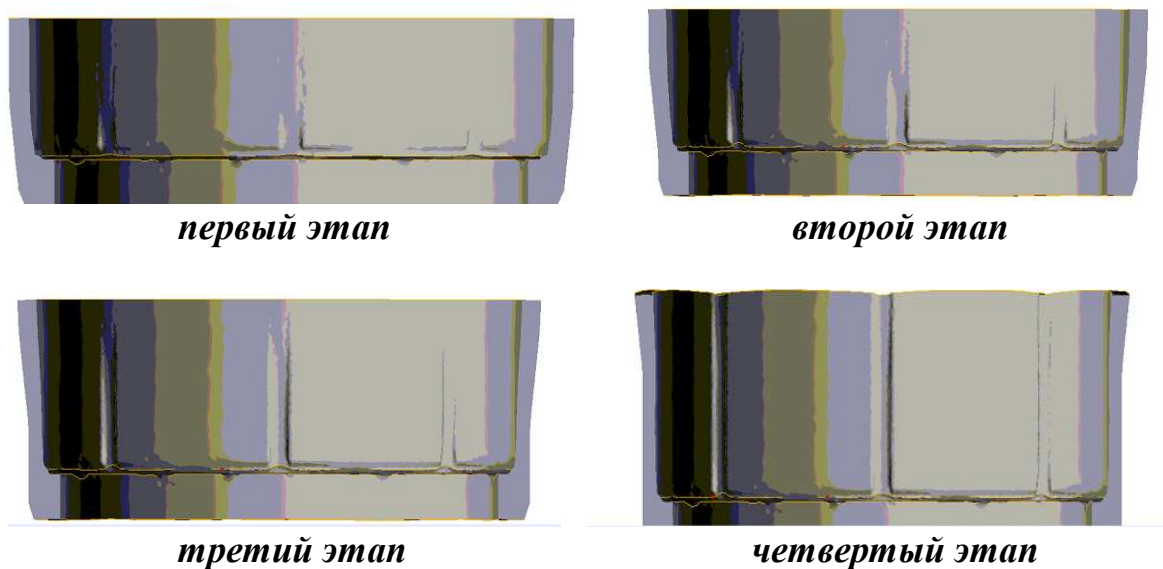


Рис. 2. Геометрия заготовки на четырех этапах формоизменения

В процессе нагружения материал заготовки нагревается. Анализ показал, что температура в области образования прямоугольного выпуклого рифта на внутренней поверхности цилиндрического стакана распределена не равномерно по объему материала (рис.3).

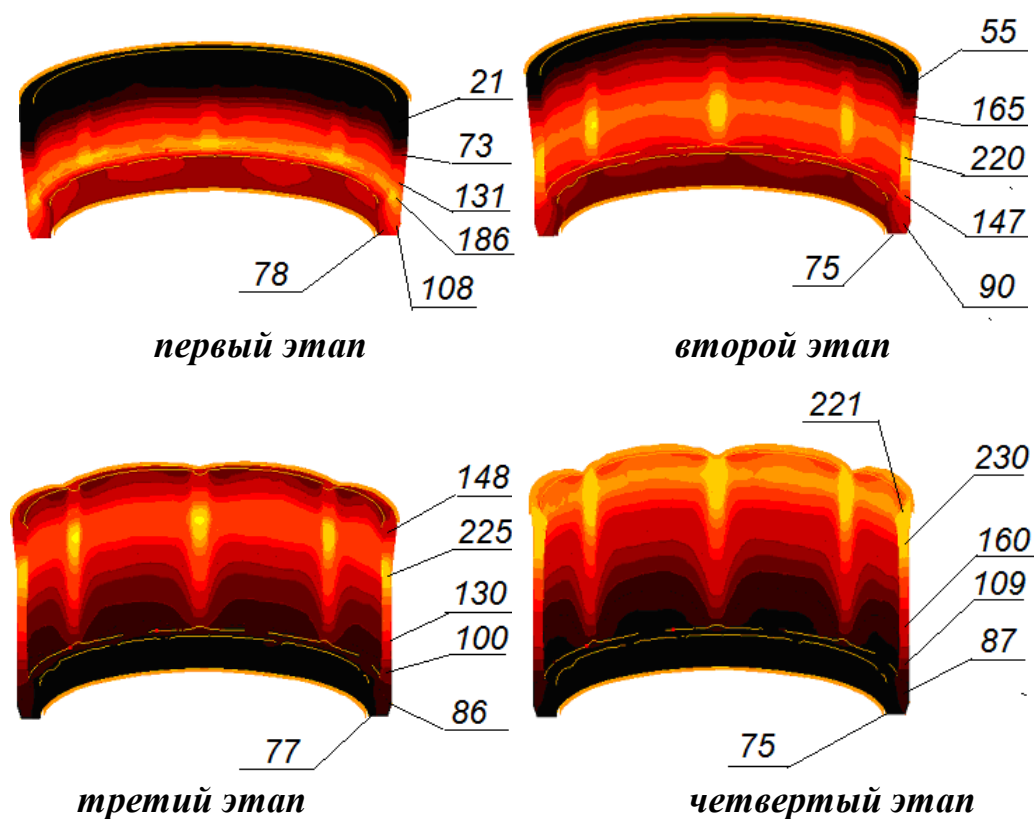


Рис. 3. Картина, характеризующая изменение температуры, в процессе деформирования заготовки на четырех этапах

По мере образования продольного рифта в процессе нагружения по высоте заготовке температура повышается. Наибольшее ее значение достигается на каждом этапе в максимальной точке области образования рифта.

На всех этапах формирования рифта металл претерпевает растяжения в области стенки, об этом свидетельствуют положительные значения гидростатического напряжения (рис.4), что сговорит о возможности разрушения материала в этой области.

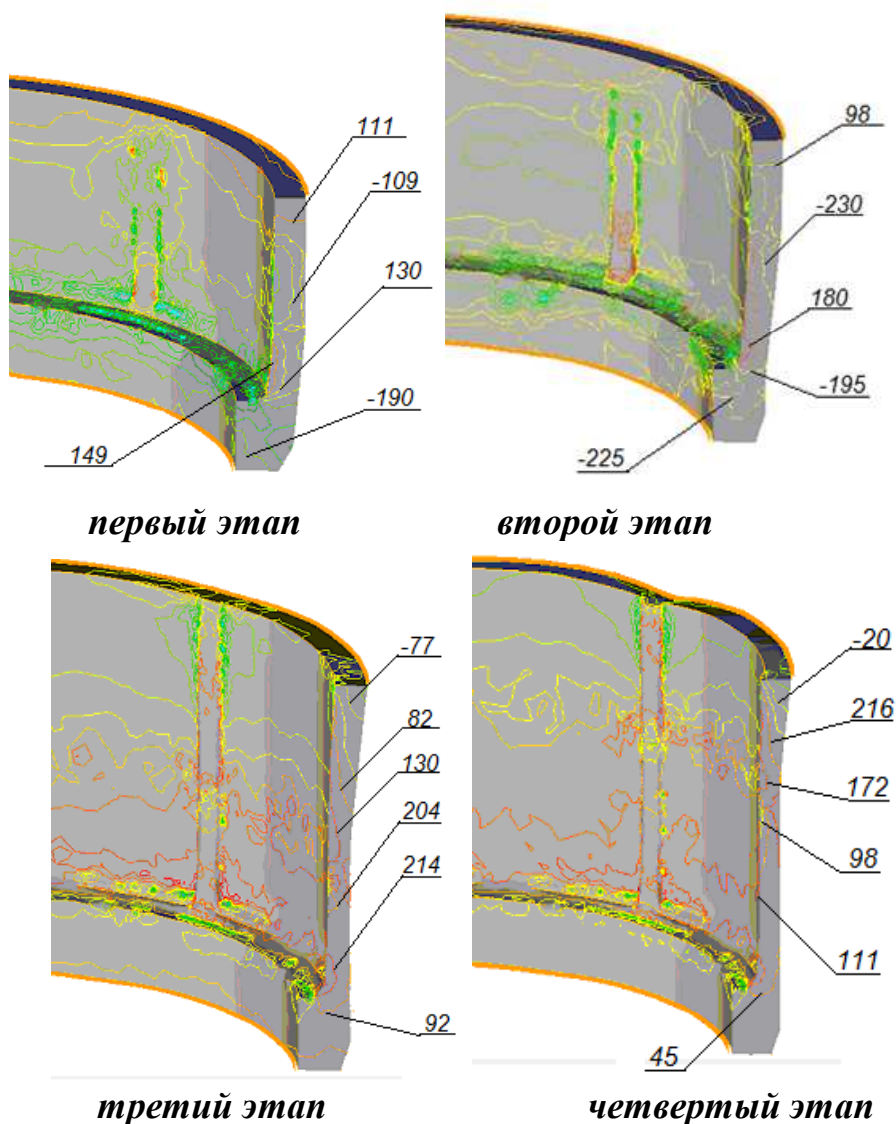


Рис. 4. Картина, характеризующая изменение среднего напряжения σ_{cp} , в процессе деформирования заготовки на четырех этапах

На каждом последующем этапе значение гидростатического напряжения возрастает. При этом, наибольшее значение растягивающего среднего напряжения реализуется на каждом этапе в области касания заготовки и матрицу (рис.1).

Анализ картины распределения интенсивности напряжения (рис.5) показал, что ее значения в процессе формирования рифта изменяются незначительно и степень неоднородности значений в области образования рифта по высоте заготовки также сравнительно небольшая.

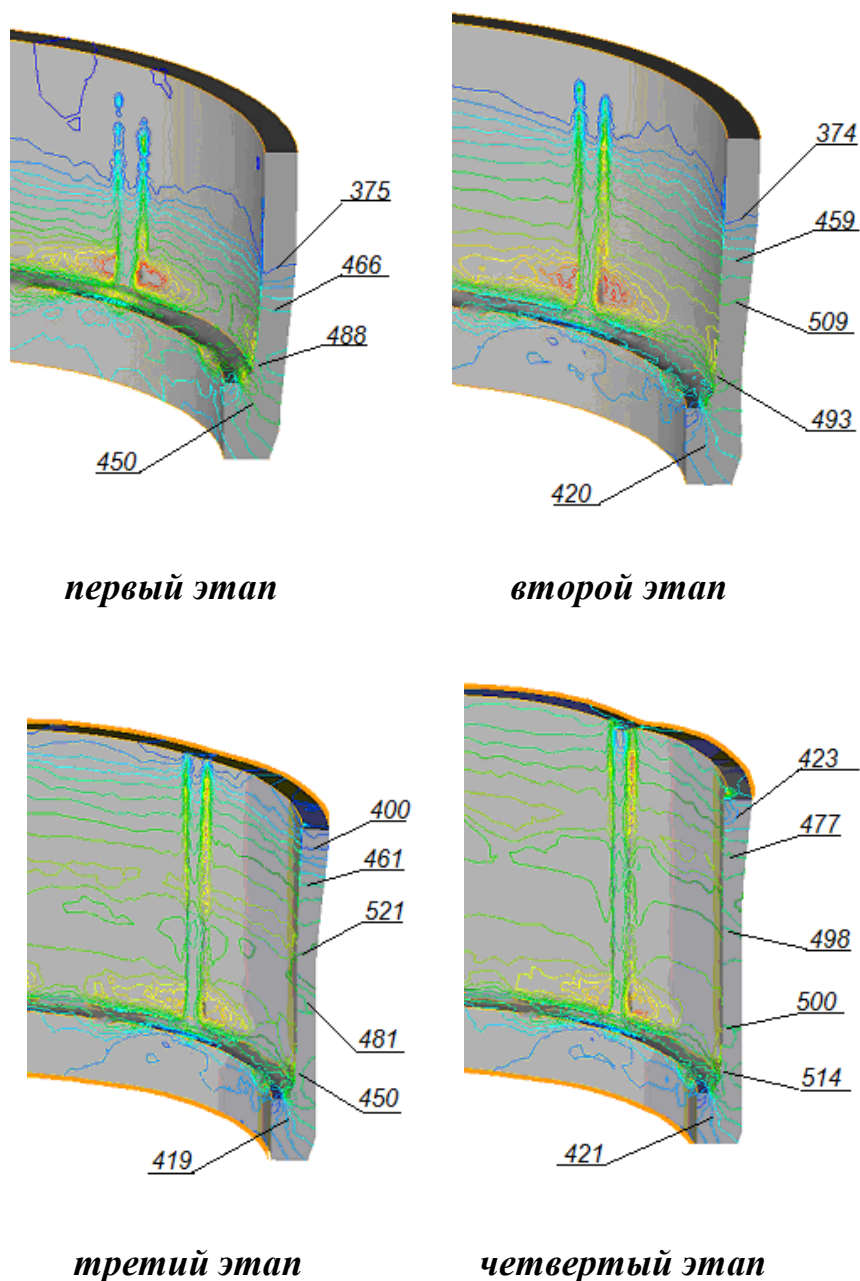


Рис.5. Картина, характеризующая изменение интенсивности напряжения σ_i , в процессе деформирования заготовки на четырех этапах

При формировании рифта в металле заготовки реализуется пластические деформации (рис.6), которые могут достигать на первом этапе значения 60%.

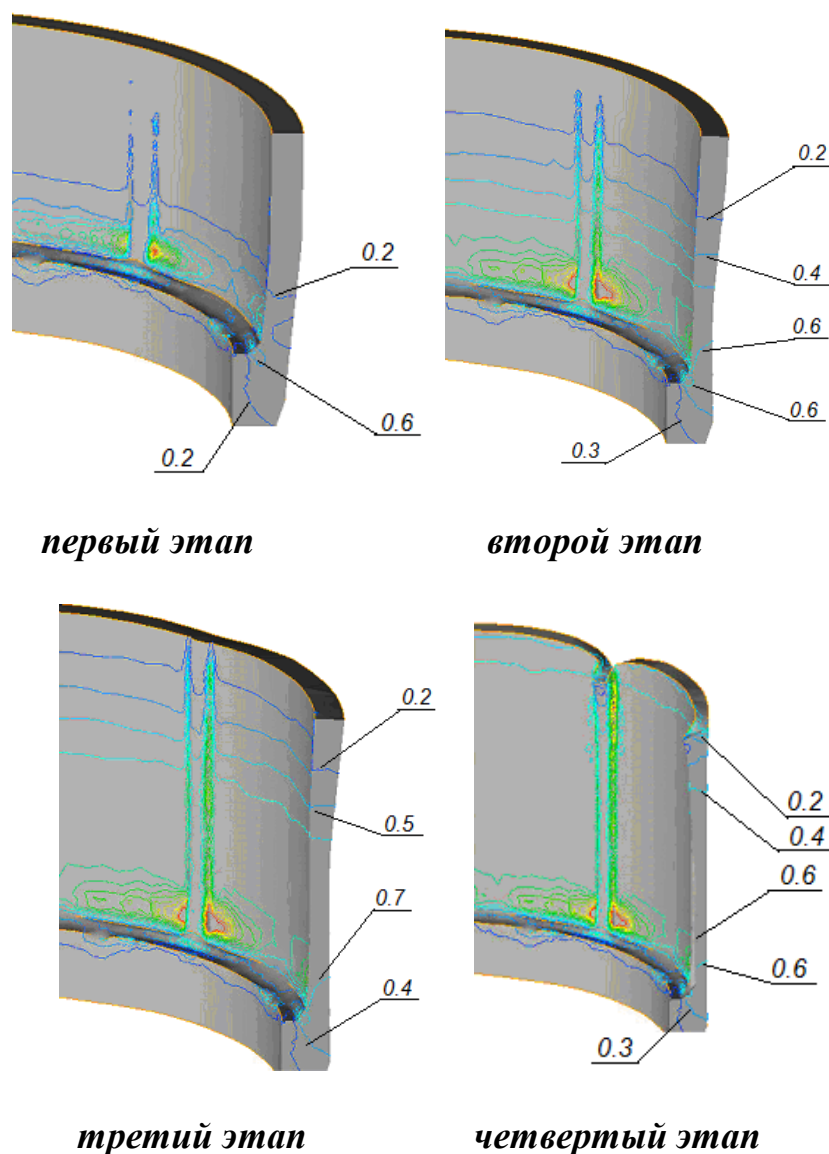


Рис.6. Картина, характеризующая изменение накопленной деформации ε_i , в процессе деформирования заготовки на четырех этапах

По мере образования рифта по высоте заготовке максимальное значение остается постоянным и реализуется в той же области.

Работа выполнена по государственному заданию Министерства образования и науки Российской Федерации на 2012-2014 годы и грантам РФФИ.

Список литературы

1. Биба Н.В., Стебунов С.А. «QForm 5.0 – программный инструмент для повышения эффективности производства в обработке металлов давлением». 2008.

Митин Олег Николаевич, канд. техн. наук, начальник отдела, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, ОАО «НПО «СПЛАВ»,

Кухарь Владимир Денисович, д-р техн. наук, проф., проректор, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Киреева Алена Евгеньевна, канд. техн. наук, доц., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

STRESS-STRAIN STATE OF MATERIAL IN REDUCTION CYLINDRICAL CUP PUNCHES WITH LONGITUDINAL GROOVES

O.N. Mitin, V.D. Kukhar, A.E. Kireeva

The article is an analysis of the stress-strain state of the material in the wall of the cylindrical workpiece by reducing its punch with longitudinal slots through a smooth conical matrix. Results characterizing the change in hydrostatic pressure, stress intensity component strain and temperature change arising in a wall of a glass in the process of reduction.

Key words: mathematical modeling, longitudinal grooves, punches, dies, reducing, rift.

Mitin Oleg Nikolaevich, candidate of technical sciences, head of department, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, JSC «NPO «Splay»,

Kukhar Vladimir Denisovich, doctor of technical sciences, professor, prorektor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kireeva Alena Evgenyevna, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 539.374; 621.983

ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОПЕРАЦИИ ВЫТЯЖКИ С УТОНЕНИЕМ ТОЛСТОСТЕННЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЗАГОТОВОК

В.Ю. Травин

Выявлены закономерности влияния анизотропии механических свойств на напряженное состояние, силовые режимы и предельные возможности деформирования при вытяжке с утонением толстостенных осесимметричных заготовок.

Ключевые слова: вытяжка с утонением, анизотропный материал, заготовка, пуансон, матрица, деформация, напряжение, сила, разрушение, механические свойства.

В различных отраслях машиностроения широкое распространение нашли толстостенные цилиндрические детали, изготавливаемые вытяжкой и вытяжкой с утонением стенки. К ним предъявляются повышенные требования к механическим характеристикам и показателям качества. Вытяж-

ку с утонением применяют при изготовлении цилиндрических деталей высотой до 10 диаметров из материалов, обладающих достаточной пластичностью в холодном состоянии. Вытяжка с утонением позволяет получать детали, имеющие относительно точные размеры и высокие прочностные свойства, в два-три раза превышающие прочность исходного материала. Это обеспечивается упрочнением металла при деформировании в сочетании с соответствующей термической обработкой [1, 2].

Материалы, подвергаемые штамповке, как правило, обладают анизотропией механических свойств, которая может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на устойчивое протекание технологических процессов ОМД [3, 4].

Разработана математическая модель операции вытяжки с утонением стенки осесимметричной толстостенной заготовки в конической матрице с углом конусности α [5, 6]. Материал заготовки принимался жесткопластическим, обладающим цилиндрической анизотропией механических свойств. Течение материала принимается осесимметричным. Анализ процесса вытяжки с утонением стенки реализуется в цилиндрической системе координат. Схема к анализу вытяжки с утонением стенки приведена на рис. 1.

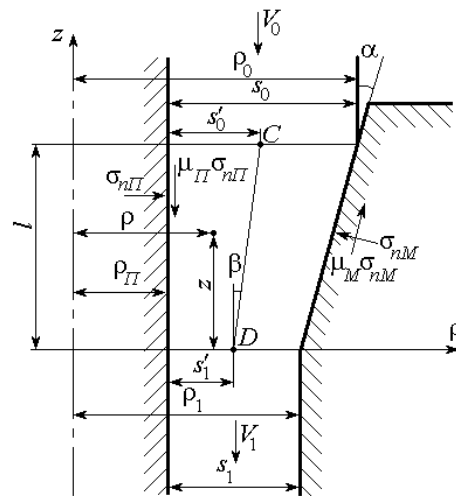


Рис. 1. Схема к анализу вытяжки с утонением стенки

Допускается, что условия трения на контактной поверхности инструмента с заготовкой подчиняется закону Кулона. Течение материала принимается установившееся. Получены основные уравнения и соотношения для анализа кинематики течения материала, напряженного и деформированного состояния заготовки, силовых режимов и предельных возможностей формоизменения анизотропных материалов. Реализовано приближенное решение поставленной задачи с привлечением уравнений равновесия, условия несжимаемости материала, условия текучести Мизеса-Хилла и уравнений связей между скоростями деформаций и компонентами тензора напряжений. Изменение направления течения материала на входе в очаг деформации и выходе из него учитывалось путем коррекции осевого напряжения на границах очага деформации по методу баланса мощностей.

Приведенные в работах [5, 6] выражения для определения кинематики течения материала, напряженного и деформированного состояний в очаге пластической деформации, силовых режимов позволили оценить влияние анизотропии механических свойств на напряженное состояние, силовые режимы и предельные возможности деформирования при вытяж-

ке с утонением толстостенных осесимметричных заготовок.

На рис. 2 приведены зависимости изменения относительных величин осевого напряжения

$$\bar{\sigma}_z = \frac{P_{cm}}{\pi(2\rho_{II} + s_1)s_1\sigma_{i0}}$$

и силы

$$\bar{P} = \frac{P}{\pi(D_0 - s_0)s_0\sigma_{i0}}$$

от коэффициента нормальной анизотропии R ($R_z = R_\theta = R$). В расчетах принималось $\sigma_{i0} = 270$ МПа; $A = 330$ МПа; $n = 0,5$; $\Omega = 1,8$; $U = -0,95$; $a_0 = 0,5$; $a_1 = 0,17$; $a_2 = 0,15$. Расчеты выполнены при следующих технологических параметрах и геометрических размерах заготовки: $D_0 = 40$ мм; $s_0 = 4$ мм; $\alpha = 18^\circ$; $\mu_M = 0,05$; $\mu_{II} = 0,1$.

Анализ графических зависимостей и результатов расчетов показывает, что величины относительного напряжения $\bar{\sigma}_z$ и силы $\bar{P}$ увеличиваются с ростом коэффициента анизотропии R и увеличением коэффициента утонения m_s (рис. 2). Здесь $D_0 = 2\rho_0$. Увеличение коэффициента анизотропии R от 0,2 до 2 приводит к росту относительных величин осевого напряжения $\bar{\sigma}_z$ на 50 %, а силы $\bar{P}$ - на 30 %.

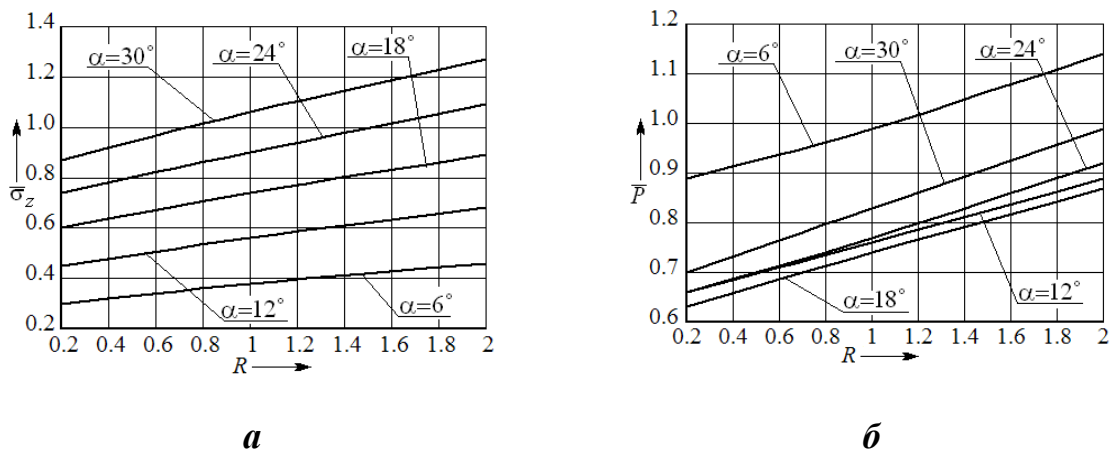


Рис. 2. Зависимости изменения $\bar{\sigma}_z$ (а) и $\bar{P}$ от R

При вытяжке с утонением стенки предельные степени деформации определяют по максимальной величине растягивающего напряжения σ_{sz}^* с учетом упрочнения на выходе из очага пластической деформации (первый критерий)

$$\sigma_{zcp} \leq \sigma_{sz}^*, \quad \sigma_{zcp} = \frac{P_{cm}}{\pi s_1 (s_1 + 2\rho_n)} \quad (1)$$

и по допустимой величине накопленных микрповреждений (второй критерий)

$$\omega_e = \int \frac{d\varepsilon_i}{\varepsilon_{i np}(\sigma/\sigma_i)} \leq \chi. \quad (2)$$

Здесь $\varepsilon_{i np} = \varepsilon_{i np}(\sigma/\sigma_i)$ - предельная интенсивность деформации; σ - среднее напряжение; $\varepsilon_{i np} = C \exp(B\sigma/\sigma_i)$; C , B - константы деформируемого материала, определяемые в зависимости от рода материала.

Интегрирование в выражении (2) ведется по траектории течения материала. До деформации $\omega_e = \chi = 0$. Разрушение будет иметь место при $\omega_e = \chi = 1$. Среднее напряжение находится по формуле

$$\sigma = (\sigma_\rho + \sigma_z + \sigma_\theta)/3.$$

В зависимости от условий эксплуатации или последующей обработки изготавливаемого изделия уровень повреждаемости не должен превышать величины χ . При назначении величин степеней деформации в процессе пластического формоизменения следует учитывать рекомендации по допустимой величине накопленных микрповреждений В.Л. Колмогорова и А.А. Богатова, согласно которым для ответственных деталей, работающих и подвергающихся после обработки давлением термической обработке (отжигу или закалке), допустимой величиной накопленных микрповреждений следует считать $\chi = 0,25$, а для неответственных деталей может быть принята $\chi = 0,65$ [7, 8].

Графические зависимости изменения предельного коэффициента утонения $m_{s np}$, вычисленного по критерию разрушения (1) и (2), от коэффициента анизотропии R приведены на рис. 3.

Здесь кривая 1 соответствует величине $m_{s np}$, определенной по максимальной величине осевого напряжения σ_z на выходе из очага пластической деформации (1); кривая 2 соответствует величине $m_{s np}$, вычисленной по допустимой величине накопленных микрповреждений (2) при $\chi = 0,25$; кривая 3 – при $\chi = 0,65$; кривая 4 - $\chi = 1,0$.

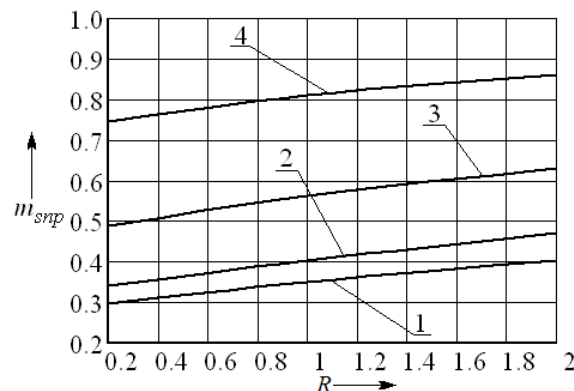


Рис. 3. Зависимости изменения $m_{s np}$ от R ($\alpha = 18^\circ$)

Расчеты выполнены при $s_0 = 4$ мм; $D_0 = 40$ мм; $\mu_M = 0,05$; $\mu_D = 0,1$. Анализ графиков и результатов расчета показывает, что увеличение коэффициента анизотропии R от 0,2 до 2 приводит к росту предельного коэффициента утонения m_{spr} на 30 %.

Таким образом, предложенная математическая модель операции вытяжки с утонением стенки осесимметричных заготовок из анизотропного материала может быть использована для оценки влияния анизотропии механических свойств на напряженное состояние, силовые режимы и предельные возможности деформирования при вытяжке с утонением толстостенных осесимметричных заготовок.

Работа выполнена по государственному заданию Министерства образования и науки Российской Федерации на 2012-2014 годы и грантам РФФИ.

Список литературы

1. Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н. Технология и автоматизация листовой штамповки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 480 с.
2. Теория обработки металлов давлением / Учебник для вузов / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь / под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.
3. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Трегубов В.И. Теория и технология штамповки анизотропных материалов / под ред. С.С. Яковлева. М.: Машиностроение, 2012. 400 с.
4. Глубокая вытяжка анизотропных материалов: монография / С.С. Яковлев, В.И. Трегубов, В.Д. Кухарь, В.Ю. Травин // под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. 225 с.
5. Грязев М.В., Яковлев С.С., Травин В.Ю. Силовые режимы вытяжки с утонением стенки толстостенных осесимметричных заготовок из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2013. Вып. 6. С. 3-11.
6. Травин В.Ю., Грязев М.В., Яковлев С.С. Предельные возможности вытяжки с утонением стенки толстостенных осесимметричных заготовок из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2013. Вып. 6. С. 21-26.
7. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет (УПИ), 2001. 836 с.
8. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. 329 с.

Травин Виталий Юрьевич, канд. техн. наук, доц., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

THE EFFECT OF ANISOTROPY OF MECHANICAL PROPERTIES OF THE
TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF OPERATION OF EXTRACTS FROM THE
REDUCTION OF A THICKNESS OF THICK-WALLED AXISYMMETRIC BLANKS

V.Y. Travin

Revealed regularities of influence of anisotropy of mechanical properties on the stress state, power modes and limits of deformation in the extraction system with decreasing thickness of thick-walled axisymmetric blanks.

Key words: kitchen with утонением, an anisotropic material procurement, punch, matrix, deformation, voltage, power, destruction, mechanical properties.

Travin Vitalij Jur'evich, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК. 621.7, 539.3

**ФОРМИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ РИФТОВ НА ВНУТРЕННЕЙ
ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СТАКАНА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПУАНСОНА
С ПРОДОЛЬНЫМИ ПАЗАМИ**

О.Н. Митин, В.Д. Кухарь, А.Е. Киреева

В статье рассмотрено математическое моделирование процесса формирования продольных рифтов на внутренней поверхности стакана с помощью пуансона с продольными пазами через коническую матрицу методом редуцирования, с использованием программного комплекса QForm 2D/3D. Выявлены основные закономерности.

Ключевые слова: математическое моделирование, продольные пазы, пуансон, матрица, редуцирование, рифт.

В специальных отраслях машиностроения существует ряд деталей, имеющих форму цилиндра, на внутренних поверхностях которых выполнены углубления в виде канавок (рифлей). В работе [2] было выявлено, что наиболее оптимальным способом нанесения рифтов на заготовках является метод редуцирования.

Исследуем с помощью программного комплекса QForm 2D/3D [1] особенности технологического процесса получения изделия приведенного на рис.1., с помощью метода редуцирования. В качестве исходной заготовки использовался цилиндрический стакан, выполненный из стали 10 приведенный на рис.2.

Чертежи пуансона и матрицы для получения рифлей приведены на рис.3.



Рис.1. Готовое изделие

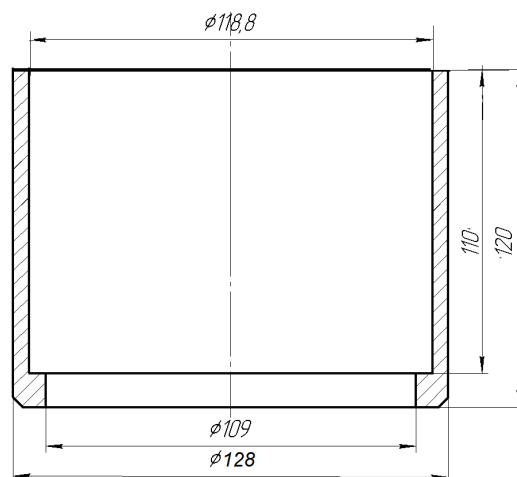
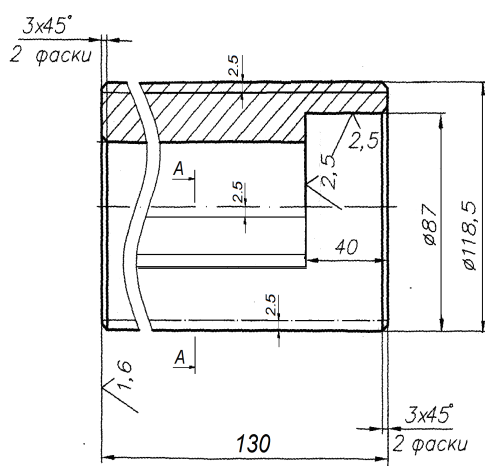
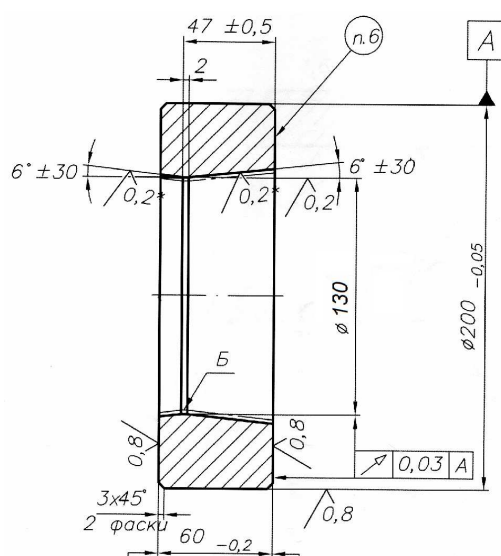
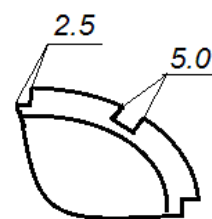


Рис.2. Исходная цилиндрическая заготовка



а

A-A



б

Рис. 3. Чертеж пуансона (а) и матрицы (б)

Пуансон был выполнен из стали 6Х6ВЗМФС, матрица из стали 9ХС, в качестве смазки был выбран материал qw-st-c. В качестве оборудования был выбран гидравлический пресс 50MN.

На первом этапе необходимо осуществить трехмерное моделирование инструмента и заготовки с помощью подпрограммы QShape программного комплекса QForm 2D/3D.

В этом случае схема процесса редуцирования будет иметь вид, рис.5.

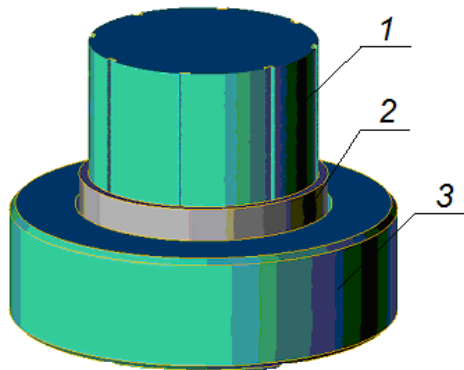


Рис.5. Схема процесса редуцирования:
1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица

На данной схеме приведена заготовка высота, которой значительно меньше той заготовки, которая требуется готового изделия. Это связано с тем, что данный технологический процесс с некоторого момента нагружения должен носить стационарный характер. И все исследование напряженно-деформированного состояния возникающих в заготовке и инструменте, необходимо проводить на стационарной стадии процесса.

Однако заранее не известно, с какого момента времени процесс достигнет стационарной стадии, в связи с чем, были выбраны заготовки с разными высотами (рис.6).

Сечение стакана полученного после редуцирования рифленным пуансоном представлено на рис.7.

Численный анализ процесса позволил получить графики зависимости технологического усилия процесса в зависимости от перемещения инструмента, приведенные на рис.8.

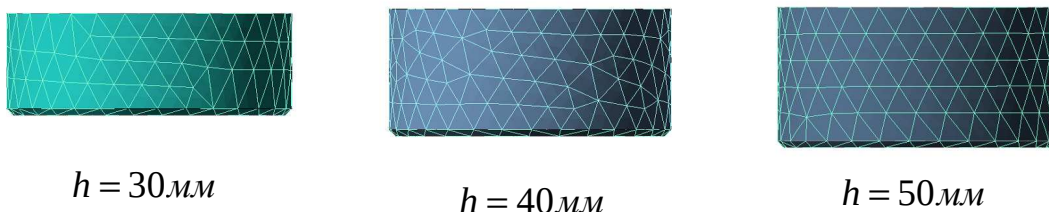


Рис. 6. Исследуемые заготовки с разными высотами



Рис.7. Окончательный вид изделия в разрезе

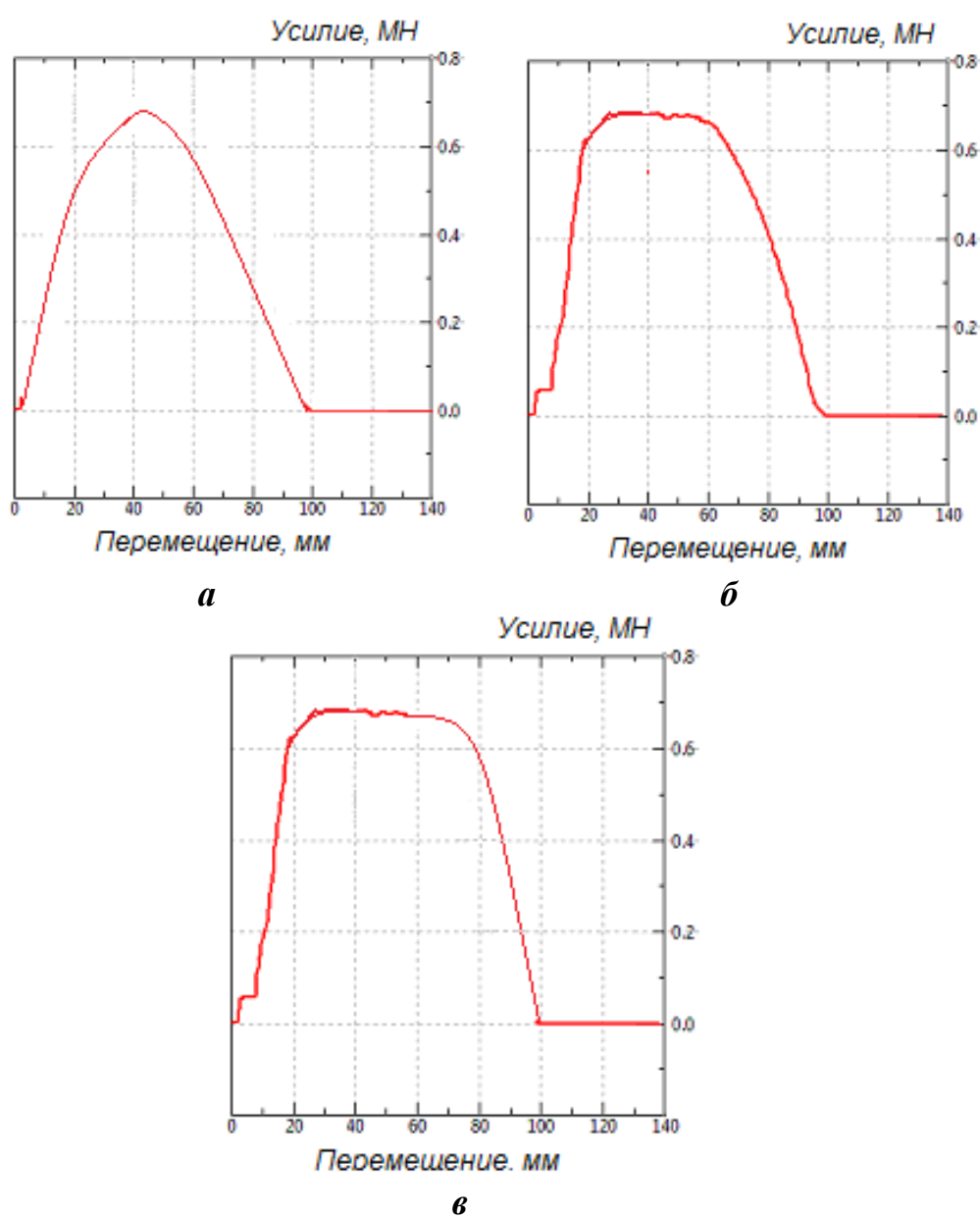


Рис. 8. Зависимость, характеризующая изменение величины усилия процесса от деформации заготовки $h=30\text{мм}$, $h=40\text{мм}$, $h=50\text{мм}$

Анализ показал, что стационарная стадия процесса (усилие достигает максимального значения и остается постоянным) начинает реализовываться при редуцировании заготовки высотой 40мм.

Работа выполнена по государственному заданию Министерства образования и науки Российской Федерации на 2012-2014 годы и грантам РФФИ.

Список литературы

1. Кухарь В.Д., Бойко О.А Исследование процесса вытяжки детали «стакан» с помощью программы QForm 2D/3D // Вестник ТулГУ. Серия «Актуальные вопросы механики». 2012. Вып.8. Тула: Изд-во ТулГУ. С. 32 - 38.

2. Митин О.Н., Иванов Ю.А. Анализ существующих технологий получения цилиндрических заготовок с рифлением // Известия ТулГУ. Серия «Технические науки». 2013. Вып.1. Тула: Изд-во ТулГУ. С. 150 - 157.

Митин Олег Николаевич, канд. техн. наук, начальник отдела, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, ОАО «НПО «СПЛАВ»,

Кухарь Владимир Денисович, д-р техн. наук, проф., проректор, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Киреева Алена Евгеньевна, канд. техн. наук, доц., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

GENERATION OF LONGITUDINAL RIFT ON THE INNER SURFACE OF A CYLINDRICAL CUP USING PUNCHES WITH LONGITUDINAL GROOVES

O.N. Mitin, V.D. Kukhar, A.E. Kireeva

The article discusses the mathematical modeling of the process of formation of longitudinal rifts on the inner surface of the glass with a punch with longitudinal slots through a conical matrix reduction method using a software system QForm 2D/3D. The main patterns.

Keywords: mathematical modeling, longitudinal grooves, punches, dies, reducing, rift.

Mitin Oleg Nikolaevich, candidate of technical sciences, head of department, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, JSC NPO Splav,

Kukhar Vladimir Denisovich, doctor of technical sciences, professor, prorektor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kireeva Alena Evgenевна, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ОДНООСНОМ И ДВУХОСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Я.А. Вилимок, К.А. Назаров, А.К. Евдокимов

Сравниваются одноосный и двухосный методы испытаний листового материала на растяжение. Определены зависимости напряжений от степени деформации образцов при различных методах испытаний и анализируются полученные отклонения.

Ключевые слова: напряжение, предел прочности, одноосное и двухосное испытание на растяжение, максимальная нагрузка, степень деформации.

Основными проблемами изготовления штампованных деталей из листа являются: образование трещин на углах, зигах и выпуклостях, зависящих от неблагоприятного сочетания пластических свойств материала и напряженно-деформированного состояния деформируемого полуфабриката; искажение формы детали из-за неверно подобранного контура заготовки; высокая себестоимость изделий, связанная с выбором запаса в материале прочности и коррозионной стойкости.

Существует большое количество методов испытания листовых металлов на пластичность и штампуемость. Наиболее общим определением механических свойств металла являются испытания на одноосное растяжение, сжатие и кручение специальных образцов. Для определения локальных свойств металла используют методы испытания на твердость. Для оценки предельных характеристик конкретных операций (вытяжка, формовка, гибка) существуют методы испытания на штампуемость по своей схеме деформирования близкие к осуществляемым операциям.

Условие текучести при деформировании заготовки любой формы обычно сравнивается с одноосным растяжением или сжатием [1, 2]. При двухосном растяжении (а также других схем испытания), которое больше подходит к реальным технологическим процессам, приходится соответственно корректировать напряженное состояние процессов. Для оценки предельных состояний деформирования не обязательно строить графики упрочнения, достаточно проанализировать напряжения в зоне образования шейки или разрушения. Часто это делают по одноосному испытанию.

Была поставлена задача: сравнить значения одноосного предела истинной прочности σ_B^1 со значением двухосного предела истинной прочности σ_B^2 и установить между ними зависимость типа $\sigma_B^1 = k\sigma_B^2$, где k – коэффициент корреляции. Предел прочности σ_B^1 был получен путем испытания на растяжение образцов в виде полосы из стали 12X18H10T (ГОСТ 4986-79) толщиной 1 мм на оборудовании фирмы Instron. Предел прочности σ_B^2 был получен с помощью метода Эриксона на испытательной машине МТЛ-10Г,

который был применен на образце в виде мембраны из той же стали 12X18H10T толщиной 1 мм.

Измерения проводили в момент наступления предельной деформации, т.е. при образовании шейки в образце. Образцы перед измерением термообработали по стандартному методу закалки [3].

В соответствии с рекомендацией ГОСТ 1497-84 производилось не менее 3 испытаний для каждого метода. Результат испытаний оценивался статистически по среднеквадратическому отклонению:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}},$$

где x_i - единичное измерение, $\bar{x}$ - среднее арифметическое значение величины для n измерений ($\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$).

Для одноосного испытания на растяжение образцов применялась электромеханическая машина (Рис. 1) со специальными боковыми захватами и программным обеспечением Bluehill 2. Захваты были подобраны так, чтобы крепко удерживать плоский образец, не вызывая соскальзывания или разрушений около губок. Длина рабочей области образца составляет 24 мм, ширина 15 мм. Погрешность измерения нагрузок электромеханической машины Instron составляет $\pm 0,5\%$, что удовлетворяет требованиям эксперимента.



Рис. 1. Машина для испытания на растяжение фирмы Instron

При максимальной нагрузке, образуется «шейка» и наступает разрыв образца (Рис. 2). По завершению испытания, с помощью программного обеспечения оборудования были автоматически сгенерированы таблицы с выходными данными для каждого эксперимента. Для испытанного материала были определены предел прочности σ_B^1 и среднеквадратическое от-

клонение. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты одноосного испытания на растяжение

№	Материал	S_0 , мм	№ эксп.	σ_B^1 , Н/мм ²	Среднеквад. отклонение
1	Сталь 12Х18Н10Т	0,89	1	738,43	1,64%
		0,88	2	735,15	
		0,885	3	736,74	

Полученная величина среднеквадратического отклонения составляет менее 5% от среднеарифметического значения, т.е. в пределах допустимого отклонения.

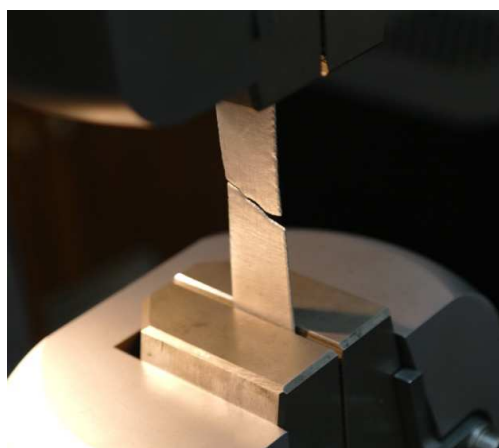
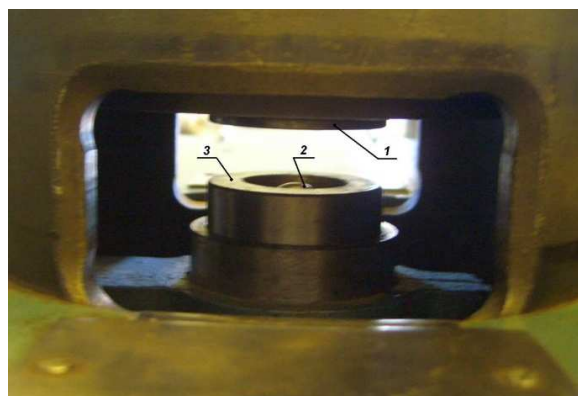


Рис 2. Образец после испытания на растяжение

Двухосное испытание на растяжение выполнялось на машине-приборе модели МТЛ-10Г, регистрирующей силу формовки лунки и силу прижима заготовки. Комплект испытательного инструмента представлен на рис. 3.



**Рис. 3. Комплект инструмента для испытания на выдавливание лунки по методу Эриксона (ГОСТ 10510-80):
1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – прижим**

Условие проведения испытания было выдержано в соответствии рекомендациям стандарта на испытание. Машина для испытания на выдавливание листов и лент обеспечивает плавное изменение глубины вдавливания пуансона с погрешностью не более 0,1 мм. Размеры испытательного инструмента были выбраны в соответствии со стандартом. Сила прижима составляла около 10 кН. Диаметр пуансона 20 мм.

В процессе испытания проводилось выдавливание лунки на образцах из 12Х18Н10Т (Рис. 4). Для определения интенсивности деформации на образец перед испытанием наносилась делительная сетка [4]. Фиксировалась сила деформирования, а далее определялась глубина полученной лунки. При максимальной нагрузке наступает разрыв по дуге окружности, указывающий на состояние материала близкое к изотропному, а чистая гладкая поверхность лунки характеризует мелкозернистую структуру.

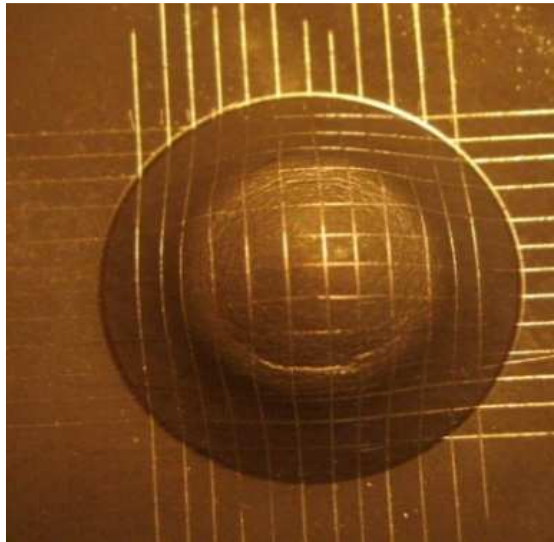


Рис. 4. Образец с нанесенной сеткой

Прочностные характеристики испытанных материалов, полученные по данным эксперимента, оценивались статистически.

Для испытанного материала было вычислено среднеквадратическое отклонение: 0,93 % (Табл. 2). Полученная величина составляет менее 5% от среднеарифметического значения, т.е. в пределах допустимого отклонения.

Для каждого испытания материала был определен истинный предел прочности:

$$\sigma_B^2 = \frac{P_{\max}}{f},$$

где $P_{\max}$ - максимальная сила испытания; f - площадь поперечного сечения лунки в месте образования «шейки» или трещины $f = \pi dS$, где d - диаметр

окружности образца в месте образования трещины, S – средняя текущая толщина образца. Результаты вычислений представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты двухосного испытания на растяжение

№	Материал	№ эксп.	S , мм	σ_B^2 , Н/мм ²	Среднеквадр. отклонение
1.	Сталь 12Х18Н10Т	1	0,86	544,52	0,93%
		2	0,865	543,15	
		3	0,87	542,74	

Таким образом, среднеарифметический истинный предел прочности для одноосного растяжения σ_B^1 составляет 736,77 Н/мм², а такой же истинный предел прочности при двухосном растяжении σ_B^2 равен 543,47 Н/мм². Отношение предельных значений напряжений $\sigma_B^1 = k\sigma_B^2$ принимает следующий вид: $\sigma_B^1 = 1,356\sigma_B^2$, где коэффициент корреляции для нержавеющей стали $k=1,356$ достаточно существенен, чтобы им пренебрегать.

Исходя из результатов экспериментов, следует, что предел прочности, полученный одноосным растяжением, не дает полного представления о напряженном состоянии испытываемого образца и обязательно требуется испытания на двухосное растяжение, чтобы получить коэффициент корреляции для конкретного материала.

Список литературы

1. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.
2. Джонсон У., Меллор П.Б. Теория пластичности для инженеров. М.: Машиностроение, 1979. 567 с.
3. Марочник сталей и сплавов / под общ. ред. В.Г. Сорокина, М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
4. Евдокимов А.К., Назаров К.А. Способ оценки предельной деформации при локальной листовой штамповке. Патент РФ №2324918, МПК⁷, G01N 3/28, БИ №14 от 20.05.2008 г.

Вилимок Ярослав Александрович, асп., vilimokya@yahoo.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Назаров Константин Аркадьевич, асп., smsknazarov@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Евдокимов Анатолий Кириллович, д-р техн. наук, проф., akevdokimov@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

STRESS STATE OF FLAT IN SAMPLES UNIAXIAL AND BIAXIAL TENSION

Y.A. Vilimok, K.A. Nazarov, A.K. Evdokimov

Compared uniaxial and biaxial test methods sheet strength. Determined depending on the degree of stress deformation of samples with different methods of testing and analysis of the resulting deflection.

Key words: stress, tensile strength, uniaxial and biaxial tensile test, the maximum load, the degree of deformation.

Vilimok Yaroslav Aleksandrovich, postgraduate, vilimokya@yahoo.com, Russia, Tula, Tula State University,

Nazarov Konstantin Arkadevich, postgraduate, smsknazarov@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Evdokimov Anatoly Kirillovich, doctor of technical science, professor, akevdokimov@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

СОДЕРЖАНИЕ

Савельев В.В.

Кафедра «Приборы и биотехнические системы» Тульского государственного университета	3
---	---

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Богданов М.Б., Савельев В.В.

Математическая модель процесса вычисления угловых и линейных координат малогабаритного управляемого летательного аппарата с малым временем полета, двигающегося в начальный период по баллистической траектории	8
---	---

Кулешов В.В.

Акселерометр компенсационного типа	25
--	----

Белянская Е.С., Тусюк С.К.

Диагностическое Интернет-тестирование первокурсников – эффективная форма контроля и обучения	29
--	----

Тархов Н.С.

Социологические исследования студентов-первокурсников – составная часть внеучебной работы в вузе	32
--	----

Антоненко С.В.

Социальные сети как инструмент профориентации	41
---	----

Богданов М.Б., Тархов Н.С.

Подготовка специалистов – высокое качество и эффективность	45
--	----

Индюхин А.А., Индюхин А.Ф., Коржук Н.Л.

Программное обеспечение электроэнцефалографической диагностики эпилепсии	51
--	----

Богданов М.Б.

Особенности построения навигационных систем зарубежных управляемых артиллерийских снарядов	60
--	----

Смирнов В.А., Захариков В.С.

Система стабилизации и наведения линии визирования с увеличенными углами обзора	68
---	----

<i>Прохорцов А.В.</i> Возможности определения параметров угловой ориентации по сигналам одной антенны СНС	74
---	----

<i>Томашвили А.В.</i> Применение технологии регистрации вызванных потенциалов в разработке нейроинтерфейса	80
--	----

<i>Прохорцов А.В.</i> Исследование эффективности различных типов коррекции показаний БИНС по сигналам СНС	85
---	----

<i>Ивахно Н.В.</i> Использование сглаживающих сплайнов при обработке сигналов биотехнической системы «тренажер дыхательной мускулатуры – пациент»	98
--	----

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

<i>Плахотникова Е.В., Протасьев В.Б.</i> Возможность улучшения качества функционирования систем «электропривод – запорная арматура» метрологическими методами ...	102
---	-----

<i>Белов Д.Б., Соловьев С.И.</i> Определение значимости различий в результатах наблюдений объемов потребленного и поставленного ресурса статистическими методами	110
---	-----

<i>Белов Д.Б.</i> Использование непараметрического критерия знаков и временных рядов для оценки расхождений в результатах учета количества потребленного и поставленного ресурса	116
---	-----

ЭЛЕКТРО- И НАНОТЕХНОЛОГИИ

<i>Волгин В.М., До Ван Донг, Давыдов А.Д.</i> Моделирование электрохимической обработки проволочным электродом-инструментом	122
---	-----

<i>Саломатников М.С.</i> Исследование рельефа и структуры титанового нанопокрyтия, сформированного на волокнистых материалах	136
--	-----

Козырь Д.В.

Применение плазменного канала оптического пробоя в качестве катода в электроэрозионной обработке 141

Саломатников М.С.

Разработка устройства плакирования порошков стеклянных микросфер в условиях комбинированного перемешивания частиц 146

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Агуреев И.Е., Агуреев К.И., Пастухова Н.С.

Закономерности каскадов бифуркаций сингулярных аттракторов в некоторых системах скрытой передачи информации 153

Агуреев И.Е., Агуреев К.И., Гладышев А.В.

Последовательности сингулярных аттракторов в некоторых автономных диссипативных мультиаттракторных системах 160

ТРАНСПОРТ

Дунаев В.А., Чесноков С.А., Ле Дай Лам, Лукин С.Э.

Расчеты смесеобразования в газовом двигателе с помощью интерактивной программы GAS2-DWS 172

Чесноков С.А., Ле Дай Лам, Лукин С.Э.

Расчеты горения и расширения в газовом двигателе с помощью интерактивной программы GAS2-DWS 180

ЭНЕРГЕТИКА, ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ, ЭЛЕКТРОПРИВОД

Шклярчук Ф.Н., Данилин А.Н.

Нелинейные колебания и галопирование провода с обледенением 188

Соболев А.В., Ляшенко А.И., Соболева Ю.В., Вент Д.П.

К вопросу о расчете энергосберегающей системы регулирования с цифровыми фильтрами 198

Катаев Р.А.

Усреднённые дискретные математические модели одноканальных шим преобразователей постоянного напряжения 208

<i>Капустин И.В., Катаев Р.А., Блинов Р.В.</i> Математическая модель понижающего преобразователя напряжения для прерывистого и непрерывного тока	216
--	-----

<i>Мельниченко Н.В., Маляров А.В., Мукошеева М.О., Коледенкова К.В.</i> Структурообразование в низкоуглеродистых бейнитных сталях	224
--	-----

ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

<i>Грязев В.М.</i> О возможности нарезания резьбы резцами с керамическими пластинками	230
---	-----

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

<i>Карцов С.К., Куприянов Д.Ю., Зыков А.Н.</i> Анализ методов фрактального кодирования и применение метода LBP (Local Binary Patterns) для обработки изображения	235
--	-----

<i>Нгуен Ч.Т.</i> Решение задачи распознавания речевых команд на фоне шумов	241
--	-----

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

<i>Горюнкова А.А.</i> Современное состояние и подходы к разработке систем мониторинга загрязнения атмосферы	251
---	-----

<i>Огородник А.Н.</i> Прогнозирование распространения поллютантов за пределы санитарно-защитной зоны хвостохранилищ предприятий	261
---	-----

<i>Горюнкова А.А.</i> Подходы и методы моделирования принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций	267
--	-----

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Ордин А.В., Рипецкий А.В., Щеляев А.Е.</i> Метод автоматизации акустических испытаний самолета	276
--	-----

<i>Ковальский Б.И., Янович В.С., Шрам В.Г.</i>	
Метод контроля противоизносных свойств при окислении трансмиссионных масел	283
<i>Колмогоров Г.Л., Снигирева М.В., Аверьянова Е.М.</i>	
Оптимизация технологии производства биметаллических проволочных и прутковых изделий	290
<i>Ильичев И.А.</i>	
Применение резиновых пневматических элементов в качестве упругой системы вибрационных столов	297
<i>Ковальский Б.И., Янович В.С., Шрам В.Г., Петров О.Н.</i>	
Оптический метод контроля термоокислительной стабильности трансмиссионных масел	302
<i>Делягин М.Ю., Трещёв А.А.</i>	
Связанный термомеханический расчет шарнирно опёртой сферической оболочки из разносопротивляющегося материала	311
<i>Судаков С.П., Лопат И.В., Ефимова А.И.</i>	
Напряженно – деформированное состояние материала шпинделя затвора трубопровода при динамическом нагружении	320
<i>Анамова Р.Р., Ордин А.В., Рипецкий А.В.</i>	
Методика автоматизации пространственной трассировки волноводных трактов	327
<i>Звягин К.В., Золотухин В.И., Варьяш Г.М.</i>	
Совершенствование конструкции смесителя интенсивного действия ..	336
<i>Судаков С.П., Лопат И.В., Ефимова А.И.</i>	
Оценка продольной устойчивости конических участков затворов трубопроводов	344
<i>Хай Н.Ч.</i>	
Повышение надежности подъёмно-транспортных машин	348
<i>Плахотникова Е.В., Елисеева Т.А.</i>	
Анализ причин нарушения работоспособности электроприводной запорной арматуры	352

<i>Саммалъ А.С., Левищева О.М., Фотиева Н.Н.</i> Оценка напряженного состояния обделок коллекторных тоннелей, восстанавливаемых бестраншейным способом в условиях городской застройки	361
--	-----

<i>Фам К.Т., Нгуен В.Х.</i> Построение алгоритма поиска кратчайшего пути на расширенном графе	367
---	-----

ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

<i>Митин О.Н., Кухарь В.Д., Киреева А.Е.</i> Напряженно-деформированное состояние материала при редуцировании цилиндрического стакана пуансоном с продольными пазами	373
---	-----

<i>Травин В.Ю.</i> Влияние анизотропии механических свойств на технологические параметры операции вытяжки с утонением толстостенных осесимметричных заготовок	378
--	-----

<i>Митин О.Н., Кухарь В.Д., Киреева А.Е.</i> Формирование продольных рифтов на внутренней поверхности цилиндрического стакана с использованием пуансона с продольными пазами	383
---	-----

<i>Вилимок Я.А., Назаров К.А., Евдокимов А.К.</i> Напряженное состояние плоских образцов при одноосном и двухосном растяжении	388
---	-----

Научное издание

**ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 11

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97. Подписано в печать 27.11.13

Формат бумаги 70×100 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 23,3. Уч.-изд. л. 20,0.

Тираж 500 экз. Заказ

Тульский государственный университет
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95