Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

16+
ISSN 2071-6168

ИЗВЕСТИЯ ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 5

Тула
Издательство ТулГУ
2020

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ: **ISSN 2071-6168**

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

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

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

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

Члены редакционного совета:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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

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

Члены редакционной коллегии:

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

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

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

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

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

© Авторы научных статей, 2020
© Издательство ТулГУ, 2020

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.912

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ИСПРАВЛЕНИЯ ОШИБОК В ИНФОРМАЦИОННО-ПОИСКОВЫХ ЗАПРОСАХ

М.В. Алдошин, А.Ю. Андросов, А.Ю. Бородащенко, Ю.Г. Зуева

В статье проведён анализ существующих методов исправления запросов, разработанных компаниями «Яндекс» (сервис спеллер) и «Google» (сервис google-api-spelling-java). Обоснован выбор наилучшегометода исправления ошибок, предложена обобщённая функциональная схема исправления ошибок, на основе которой разработан соответствующий алгоритм. Представленные решения апробированы с помощью макета программы информационного поиска со встроенным модулем исправления ошибок в поисковых запросах. Предложенный алгоритм исправления ошибок на основе метода Дамерау-Левенштейна позволяет в целом улучшить полноту и точность информационного поиска, а также сократить время отбора полезной информации за счет автоматизации рутинных функций.

Ключевые слова: textmining, автоматическая обработка текста, информационно-поисковый запрос, исправление ошибок.

В век современных информационных технологий невозможно представить какую-либо деятельность без использования информации. При решении типовых задач пользователи обращаются к ресурсам корпоративных сетей или сети Интернет с помощью информационно-поисковых систем (ИПС), таких как «Яндекс», «Google» и др. Поиск релевантной информации осуществляется на основе информационно-поисковых запросов. При этом возможно появлениеошибок, связанных с орфографией, синтаксисом и семантикой, при формировании запросов. К таким ошибкам могутотноситься как с точки зрения смысла, так и орфографические и синтаксические.

Возможности ИПС распознавать и находить ошибки ввода являются необходимой составляющей, иначе на поисковый запрос пользователя будет выведена некорректная информация или она вовсе будет отсутствовать. Таким образом, задача исправления ошибок в задании информационно-поискового запроса является актуальной для ИПС.

Для решения поставленной задачи на практике используется три основных метода:

1) спеллер сервис, используемый в ИПС «Яндекс» [1];

2) сервис google-api-spelling-java, используемый в ИПС «Google» [2];

3) метод Дамерау-Левенштейна [3, 4].

В поисковой системе «Яндекс» [1] используется спеллер. Спеллер – это сервис для поиска орфографических ошибок. Для их обнаружения применяется библиотека машинного обучения CatBoost, благодаря которой могут распознаваться самые исковерканные слова, а также предусматривается контекст запроса при поиске ошибок (рис. 1).

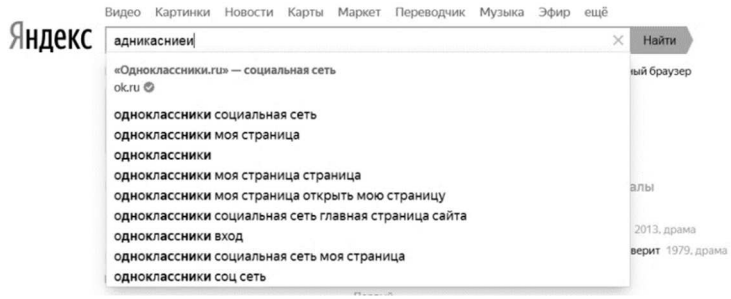


Рис. 1. Распознавание искаженного запроса

Как уже говорилось ранее, все поисковые запросы проходят через сервис исправления ошибок. При выборе заменяющего слова для запроса с ошибкой рассматриваются несколько факторов:

– частота использования слов в запросах;

– частота совместимой встречаемости слов;

– вероятность ошибки.

Образовавшееся в результате такого отбора заменяющего слова представляется оптимальным с точки зрения статистики, но не обязательно является словарным. В следствии этого не всегда корректно применять подсказки при ошибках в качестве справочника по грамматике. Цель подобной подсказки – порекомендовать самую оптимальную формулировку запроса для результативного поиска, но не обязательно правильную с точки зрения правил языка.

Если сервис найдет опечатку, для которой имеется вариация исправления, он автоматически ее заменит (рис.2).

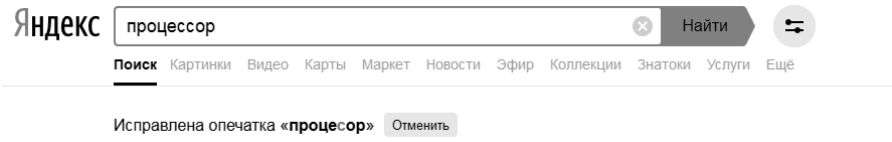


Рис. 2. Исправление опечатки в ИПС «Яндекс»

В качестве другого примера ИПС можно рассмотреть систему «Google» [2], в которой используется сервис google-api-spelling-java. Данный сервис предполагает работу с миллионным числом пользовательскихпоисковых запросов, а также работу с нейронными сетями. Внутренний интеллект алгоритма ИПС «Google» составляет рейтинг наиболее ча-

стых ошибок в запросах; они могут быть различного рода, например, типичная опечатка или смена раскладки клавиатуры. При вводе поискового запроса с ошибкой, алгоритм выделяет из этого рейтинга самую популярную ошибку и выдает информацию по запросу уже с учетом исправления этой ошибки. Остальные ошибки, которые находятся на позицию ниже в рейтинге, предлагаются пользователю как альтернативные исправленные запросы.

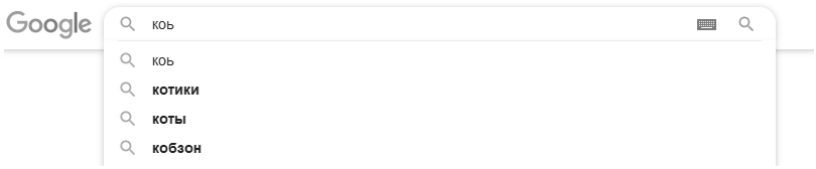


Рис. 3. Исправление опечатки в ИПС «Google»

Анализ подходов показал, что два поисковых гиганта обладают огромной базой данных запросов, которые постоянно обновляются с учетом новых пользовательских запросов и ошибок. Несмотря на использование различных сервисов исправления ошибок, принцип их работы схож. Однако их общим минусом будет являться то, что составление рейтинга всех запросов не всегда является преимуществом, так как пользователь может искать информацию по запросу, который находится в рейтинге не на первых местах.

Указанного недостатка лишен метод Дамерау-Левенштейна, при котором обнаружение и исправление ошибокв поисковом запросе осуществляется в полной мере с точки зрения показателей качества,

Расстояние Дамерау-Левенштейна является мерой «сходства» двух строк. Эта мера показывает, какое минимальное количество элементарных операций произведенных при преобразовании поискового запроса с ошибкой нужно совершить, чтобы получить безошибочный запрос. За строку принимается любое количество введенных символов. Элементарными операциями будут являться: вставка символа, удаление символа, замена символа на другой, транспозиция двух соседних символов (перестановка). Данное расстояние подразумевает под собой возможными для выполнения все четыре операции, однако между двумя строками возможно произвести только одну операцию.

Обычно операции обозначаются следующим образом:

D (delete) – удаление;

I (insert) – вставка;

R (replace) – замена;

M (match) – совпадение;

T (transposition) – перестановка.

Так, для исправления ошибочного информационно-поискового запроса «Жриноыскиий» (табл. 1) в соответствии с описанным алгоритмом необходимо произвести всего четыре элементарные операции для преобразования в безошибочный запрос «Жириновский», который храниться в БД запросов(табл.1):

M (match) – совпадение символов «Ж», «И», «Н», «О», «С», «К», «И», «Й»;

T (transposition) – перестановка местами символов «И» и «Р»;

R (replace) – замена символа «Ы» на символ «В»;

D (delete) – удаление лишнего символа «И».

Таблица 1

Таблица преобразований

M	**T**	**-**	**M**	**M**	**M**	**R**	**M**	**M**	**M**	**D**	**M**
Ж	**Р**	**И**	**И**	**Н**	**О**	**Ы**	**С**	**К**	**И**	**И**	**Й**
Ж	И	Р	И	Н	О	В	С	К	И	-	Й

Упомянутая выше мера используется в алгоритмах компьютерной лингвистики, а именно в системах проверки грамматики и орфографии текстов, а также в различных лингвистических моделях.

Классический метод предполагает, что и поисковый запрос и информация в базе данных задается в начальной форме, что не всегда позволяет корректно исправлять ошибки в запросах. Для устранения этого недостатка авторами предложено осуществлять нормализацию поискового запроса на основе существующих алгоритмов морфологического анализа. При этом повышаются требования к используемым словарям и тезаурусам русского языка.

Обобщенная схема исправления ошибок в информационно-поисковых запросах, включающая 4 этапа, представлена на рис. 4.

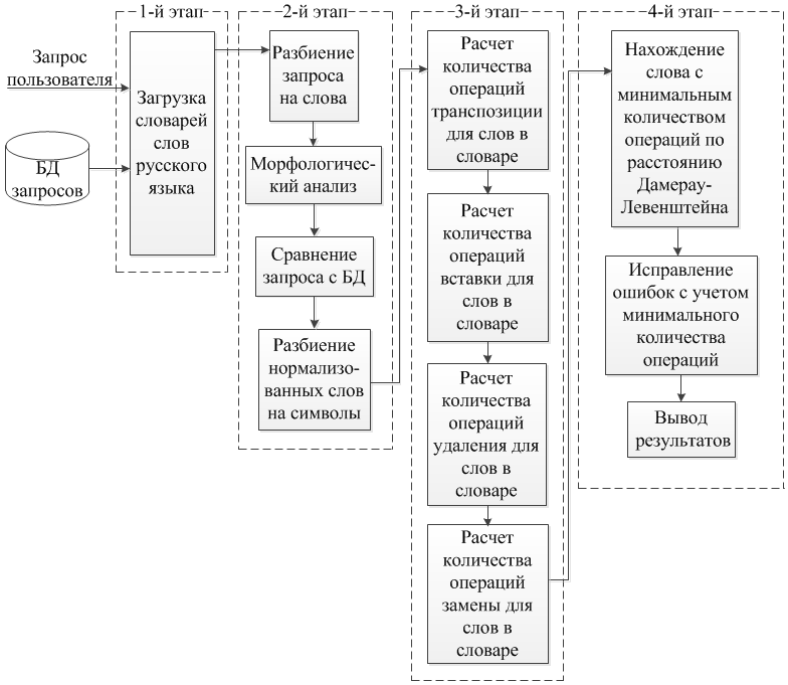


Рис.4. Обобщенная схема исправления ошибок

На вход поступают поисковые запросы пользователей. На первом этапе производится загрузка словарей и тезаурусов, далее, на втором этапе происходит нормализация запроса и его разбиение запроса на атомарные

единицы (символы). Далее (третьи и четвертый этап) осуществляются операции по выявлению ошибок в поступившем запросе и при необходимости их исправлению на наиболее вероятный правильный вариант на основе расстояния Дамерау-Левенштейна. На заключительном этапе осуществляется визуализация результатов работы алгоритма.

На основе рассмотренной схемы разработан алгоритм исправления ошибок (рис. 5).

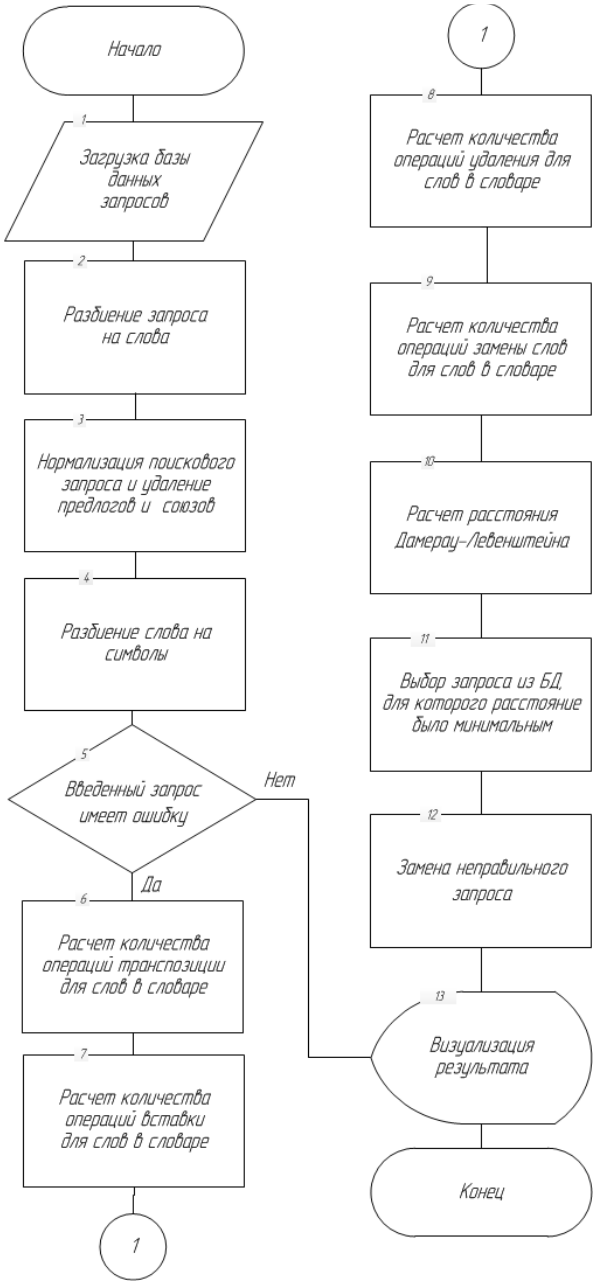


Рис. 5. Алгоритм исправления ошибокв информационно-поисковых запросах

В первом блоке происходит загрузка базы данных запросов, которая является хранилищем словаря терминов, используемых пользователем в контексте данной системы. Во втором и третьем блоке происходит разбиение словосочетания и слов на символы для дальнейших расчетов. В чет-

вертом блоке проверяется условие, при котором либо имеется ошибка в запросе, после чего, алгоритм переходит к следующему блоку, либо ошибки нет, и алгоритм переходит к блоку визуализации результата. Пятый и восьмой блоки подразумевают под собой расчет количества конкретных операций. В девятом блоке производится расчет расстояния Дамерау-Левенштейна, при котором происходит преобразование поискового запроса с ошибкой в поисковый запрос без ошибки. Десятый блок предполагает выбор запроса из БД, для которого расстояние Дамерау-Левенштейна будет минимальным. В одиннадцатом блоке происходит замена неправильного запроса на правильный, безошибочный. В двенадцатом блоке происходит визуализация полученного результата.

Рассмотрим пример работы алгоритма на основе информационно-поискового запроса «патребение электроэнергии». На первом шагезагружается база данных существующих в системе запросов. На втором шаге происходит разбиение поискового запроса пользователя по словам: «патребение» и «электроэнергии» для дальнейшей обработки запроса. На третьем шаге осуществляется нормализация, в ходе которой происходит бессловарный морфологический анализ на основе окончаний. Особенностью бессловарного метода является возможность приводить слова к начальным формам при наличии в них орфографических ошибок. Данная процедура происходит следующим образом: берутся 3-4 буквы с конца слова и, используя словарь окончаний, определяется часть речи, а затем слово переводится начальную форму. На четвертом шаге производится разбиение каждого слова посимвольно для выявления ошибок. На пятом шагевыполняется условие: если запрос не имеет ошибку, то выводится результат по запросу пользователя. Если же запрос имеет ошибку, то алгоритм переходит к шестому - девятому шагам, в которых производятся следующие операции для преобразования первого слова«патребение» в «потребление» (табл. 2).

Таблица 2

Таблица преобразований

M	**R**	**M**	**M**	**M**	**M**	**I**	**M**	**M**	**M**	**M**
П	**А**	**Т**	**Р**	**Е**	**Б**	**-**	**Е**	**Н**	**И**	**Е**
П	О	Т	Р	Е	Б	Л	Е	Н	И	Е

В табл. 2 приняты следующие обозначения: M (match) – совпадение символов «П», «Т», «Р», «Е», «Б», «Е», «Н», «И»,«Е»; R (replace) – замена символа «А» на символ «О»; I (insert) – вставка пропущенного символа «Л».

Для второго слова операции преобразования не требуются, так как ошибок в этом слове обнаружено не было (табл. 3):

M (match) – совпадение символов «Э», «Л», «Е», «К», «Т», «Р», «О», «Э», «Н»,«Е», «Р», «Г», «И», «Я».

Предложенный алгоритм показывает высокие показатели качества при обработке запросов по тематике, соответствующей базе данных подгружаемых запросов.

Таблица 3

Таблица преобразований

М	**М**	**М**	**М**	**М**	**М**	**М**	**М**	**М**	**М**	**М**	**М**	**М**	**М**
Э	**Л**	**Е**	**К**	**Т**	**Р**	**О**	**Э**	**Н**	**Е**	**Р**	**Г**	**И**	**Я**
Э	Л	Е	К	Т	Р	О	Э	Н	Е	Р	Г	И	Я

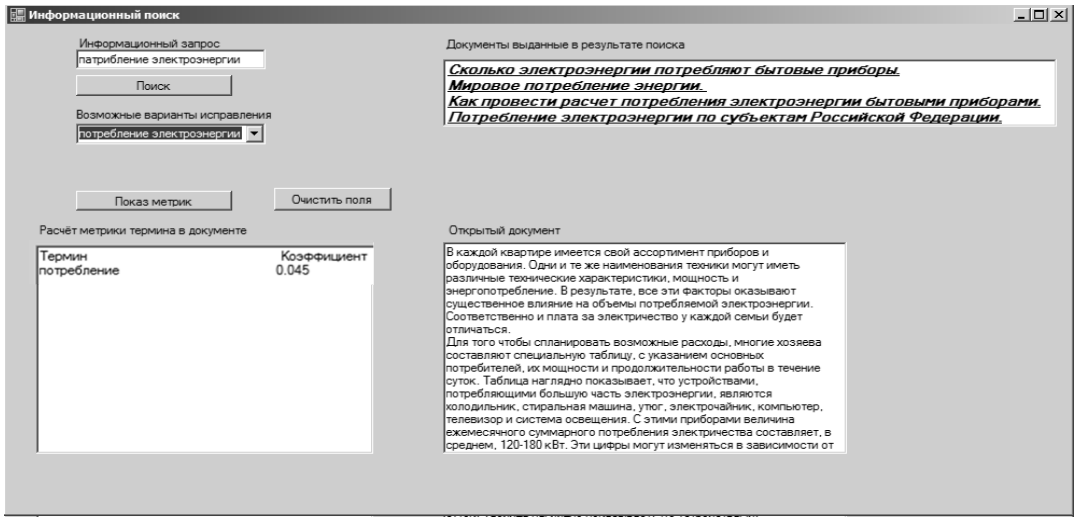


Рис. 6. Макет программы информационного поиска со встроенным модулем исправления ошибок

На основе алгоритма авторами был разработан макет программы информационного поиска со встроенным модулем исправления ошибок в поисковых запросах (рис. 6). Тестирование макета показало, что он с высокой полнотой и точностью позволяет исправлять ошибки ввода, что в целом повышает качество обработки запросов пользователей.

Список литературы

1. Официальный сайт Яндекс [Электронный ресурс] URL: www.yandex.ru (дата обращения: 27.02.2020).

2. Официальный сайт Google [Электронный ресурс] [Электронный ресурс] URL: www.google.com (дата обращения: 27.02.2020).

3. Карпенко М.П., Протасов С.В. Некоторые методы очистки словаря запросов поиска // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии. Москва Бекасово: РГГУ. 2011. С. 326-338.

4. Ерехинская Т.Н., Титова А.С., Окатьев В.В. Синтаксический анализ текста с орфографическими ошибками в системе DictascopeSyntax // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии. Москва Бекасово: РГГУ. 2011. С. 186-196.

Алдошин Михаил Васильевич, сотрудник, pioneer176@yandex.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Андросов Алексей Юрьевич, канд. техн. наук, сотрудник, pioneer176@yandex.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Бородащенко Антон Юрьевич, канд. техн. наук, сотрудник, bay55@mail.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Зуева Юлия Григорьевна, сотрудник, zuika.20@yandex.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации

MODIFIED ALGORITHM FOR CORRECTING ERRORS IN INFORMATION SEARCH QUERIES

M.V. Aldoshin, A.Yu. Androsov, A.Yu. Borodaschenko, Yu.G. Zueva

In the article the analysis of existing methods of repair requests from the companies "Yandex" (service now) and Google(google-api-spelling -java). The choice of the best error correction method is justified, and a generalized functional scheme of error correction is proposed, on the basis of which the corresponding algorithm is developed. The proposed solutions were tested using the layout of the information search program with a built- in error correction module in search queries. The proposed error correction algorithm based on the Damerau-Levenshtein method allows to improve the overall completeness and accuracy of the information search, as well as to reduce the time for selecting useful information by automating routine functions.

Key words: text mining, automatic text processing, information search query, error correction.

Aldoshin Mikhail Vasilyevich, researcher, pioneer176@yandex.ru, Russia, Orel, Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation,

Androsov Aleksei Yurevich, candidate of technical sciences, researcher, pioneer176@yandex.ru, Russia, Orel, Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation,

Borodaschenko Anton Yurevich, candidate of technical sciences, researcher, bay55@mail.ru, Russia, Orel, Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation,

Zueva Yuliya Grigirevna, researcher, zuika.20@yandex.ru, Russia, Orel, Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation

УДК 004.056

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ СТЕПЕНИ СОГЛАСОВАННОСТИ МНЕНИЙ ЭКСПЕРТОВ В СФЕРЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МЕТОДОМ НАХОЖДЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА КОНКОРДАЦИИ

И.Е. Кузьмин, А.А. Сафронов, Е.М. Баранова, С.Ю. Борзенкова

В статье приведено описание основных этапов проектирования системы по определению показателя степени согласованности мнений экспертов в области обеспечения информационной безопасности путём определения коэффициента конкордации.

Ключевые слова: информационная безопасность, информационная автоматизированная система, экспертная оценка, согласованность мнений, коэффициент конкордации.

На практике в экспертизе учувствует группа экспертов, согласованность которой необходимо выявить для корректировки данных, так как даже незначительное рассогласованность в мнениях может привести к кардинальным изменениям в точности промежуточных и конечных результатов. В данном случае компетентность экспертов не играет роли, поскольку она либо уже определена самими экспертами, либо определяется ранее на стадии отбора кандидатов на экспертизу.

При анализе мнений экспертов можно применять самые разнообразные статистические методы, описывать их — значит описывать всю прикладную статистику. Тем не менее можно выделить основные широко используемые в настоящее время методы математической обработки экспертных оценок — это проверка согласованности мнений экспертов (или классификация экспертов, если нет согласованности) и усреднение мнений экспертов внутри согласованной группы [4]. Необходимо понимать, что согласованность мнений является важной характеристикой качества результатов экспертной оценки [2]. Существует определённый ряд способов определения согласованности мнений, например, методом оценки по величине коэффициента корреляции Спирмера, коэффициентом вариации, парной ранговой конкордации или коэффициентом ассоциации. Причём часть методов подразумевает парное сравнение и оценку мнений экспертов.

Итак, в статье рассмотрена разработка программного обеспечения (ПО) для определения согласованности мнений экспертов путём анализа входных данных с помощью вычисления коэффициента конкордации W Кендалла-Смита.

При строгом ранжировании оценок (в случае отсутствия равных рангов) экспертов формула вычисления коэффициента конкордации представлена следующим образом:

$$w_k = \frac{12\sum_{i=1}^{n}\left(\sum_{j=1}^{m} r_{ij} - \frac{m(n+1)}{2}\right)^2}{m^2 n(n^2-1)}, \quad (1)$$

где m – число экспертов; n – число оцениваемых параметров (направлений); r_{ij} – ранг i-го параметра, присвоенный j-ым экспертом.

В случае наличия равных рангов формула вычисления коэффициента конкордации имеет вид:

$$w = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left\{\sum_{j=1}^{m} r_{ij} - \frac{1}{2}m(n+1)\right\}}{\frac{1}{12}m^2 n(n^2-1) - \frac{1}{12}m\sum_{j=1}^{n}\sum_{k}(t_i^3 - t_i)}, \quad (2)$$

где m – число экспертов; n – число оцениваемых параметров (направлений); r_{ij} – ранг i-го параметра, присвоенный j-ым экспертом; t_i – число повторений каждого ранга для i-го эксперта; k – число повторяющихся рангов для i-го эксперта.

Постановка задачи:

ПО не позиционируется как информационная система (база данных о факторах/направлениях и экспертах не используется в связи с тем, что главная цель – вычисление степени согласованности мнений экспертов методом оценки коэффициента конкордации);

создание графической оболочки для лучшего визуального контакта с системой;

возможность ввода оценок экспертов от 0 до + ∞;

корректное вычисление коэффициента конкордации с ранжированием исходных данных;

корректное формирование оценки степени согласованности мнений экспертов, согласно алгоритму вычислений.

Обобщенный алгоритм работы программы. Предполагается, что информация о факторах собирается ранее, поэтому на вход ПО подаётся априорная информация. Ввод данных осуществляется посредством формы, которая формируется исходя из указанных данных о количестве экспертов и факторах.

В разрабатываемом ПО применяется метод с ранжированием экспертных оценок, поэтому после обработки данных производится обработка данных оценок на выявление идентичных групп оценок (число связок в оценках i-го эксперта), так как от этого зависит последующий алгоритм действий программы. В зависимости от количества повторяющихся элементов в оценках (в случае, когда повторяющихся оценок не обнаруживается ПО не производит подсчёт показателя равных рангов) производится вычисление коэффициента конкордации по формулам 1 и 2 и делается вывод на основе полученных данных.

На рис.1 представлена IDEF0 модель, контекстная диаграмма и дочерняя диаграмма верхнего уровня, отображающие структуру и функции ПО определения степени согласованности мнений экспертов.

Описание принципа создания графической оболочки. Для создания графической оболочки в Qt в приложении применяются два элемента SpinBox и PushButton. Два элемента SpinBox задают количество экспертов и факторов, вторая группа элементов PushButton предназначена для

построения таблицы для ввода данных. Построенная таблица содержит объекты QLineEdit. Кнопки позволяют запустить алгоритм построения таблицы ввода данных и рассчитать коэффициент конкордации. На рис.2 представлен пример графического интерфейса, разработанного ПО.

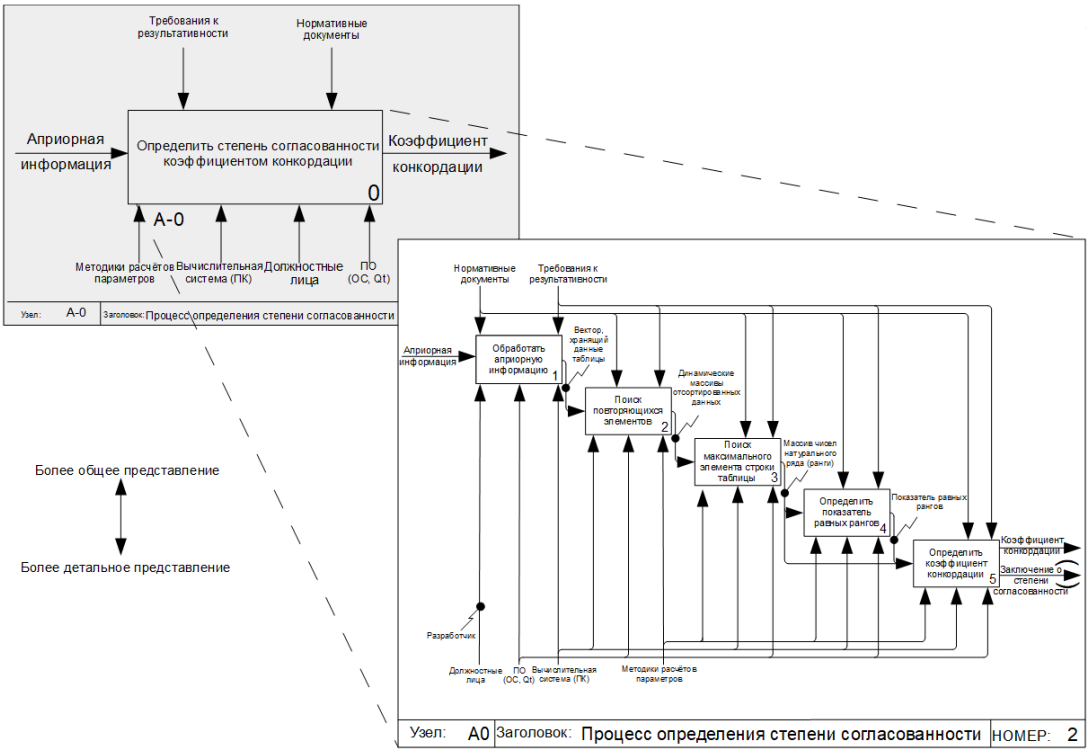


Рис. 1. Структурно-логическая схема в нотациях IDEF0 модели определения степени согласованности мнений экспертов

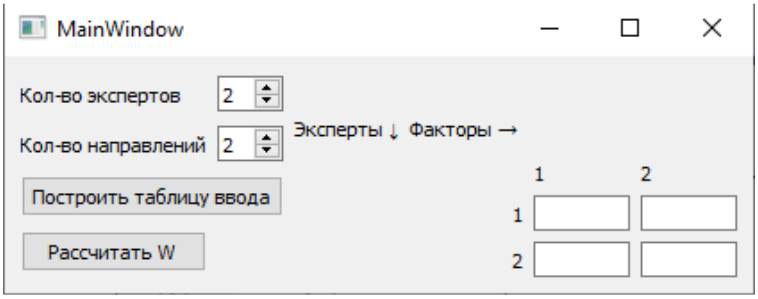


Рис. 2. Графический интерфейс приложения

На рис. 3 представлен листинг кода, демонстрирующий принцип создания таблицы ввода данных.

Описание принципа создания программного кода. На рис.4 представлен листинг кода расчётного алгоритма программы.

Принцип работы расчётного алгоритма заключается в том, что вводится переменная типа bool для первоначальной оценки введённых данных. Далее вводятся две переменные типа int, которые служат для присваивания им введённых данных: количество экспертов и факторов. На основе вышеперечисленных первоначальных данных создаются две матрицы одинакового размера.

```
void MainWindow::on_pushButton_2_clicked()
{
    Ved.clear();
    qDeleteAll(Ved);
    Ved.resize(0);
    while (QLayoutItem* item = ui->gridLayout->takeAt(0)) {
        delete item->widget();
        delete item;
    }
    while (QLayoutItem* item = ui->horizontalLayout->takeAt(0)) {
        delete item->widget();
        delete item;
    }
    while (QLayoutItem* item = ui->verticalLayout->takeAt(0)) {
        delete item->widget();
        delete item;
    }
    int exps, quest;
    exps = ui->spinBox->value();
    quest = ui->spinBox_2->value();
    for(int i = 0; i < exps; i++){
        QLabel *lbV = new QLabel(QString::number(i + 1));
        ui->verticalLayout->addWidget(lbV);
    }
    for(int i = 0; i < quest; i++){
        QLabel *lbH = new QLabel(QString::number(i + 1));
        ui->horizontalLayout->addWidget(lbH);
    }
    int row = 0, column = 0;
    for(int i = 0; i < quest * exps; i++){
        QLineEdit *sas = new QLineEdit;
        Ved.push_back(sas);
        ui->gridLayout->addWidget(sas, row, column);
        column++;
        if (column == quest){
            column = 0;
            row++;
        }
    }
}
```

Рис. 3. Листинг кода создания таблицы для ввода данных

```
void MainWindow::on_pushButton_clicked()
{
    bool repeat = false;
    int m = ui->spinBox->value(), n = ui->spinBox_2->value();
        //n;//кол-во направлений/столбиков
        //m;//кол-во экспертов/строк
        int **B_m = new int*[n]();
        for (int i = 0; i < m; i++) B_m[i] = new int[n]();

        int **rang = new int*[n]();
        for (int i = 0; i < m; i++) rang[i] = new int[n]();
        int vcount = 0;
        for(int i = 0; i < m; i++){
            for(int j = 0; j < n; j++){
                B_m[i][j] = Ved[vcount]->text().toInt();
                vcount++;
            }
        }
        for(int i = 0; i < m; i++){
            if(repeat) break;
            QList<int> list;
            QSet<int> set;
            for(int j = 0; j < n; j++){
                list.append(B_m[i][j]);
            }
            //set = QSet<int>(list.begin(), list.end());
            set = list.toSet();
            if(set.size() != list.size()) repeat = true;
        }
        if (repeat){
            WithRepeat(m, n, B_m, rang);
        }
        else{
            WithoutRepeat(m, n, B_m, rang);
        }
```

Рис. 4. Листинг работы расчётного алгоритма

Матрица B_m служит для размещения в ней введённых пользователем значений из таблицы, представленной на рис.3 с помощью вектора Ved, хранящего данные типа QLineEdit. Далее производится построчный

перебор матрицы и с помощью объектов типа QList и QSet устанавливается приготовленный флаг в нужное положение в зависимости от повторяющихся значений в строке. Соответственно, в зависимости от значения repeat вызывается функция WithRepeat() или WithoutRepeat().

Случай, когда алгоритм определил повторяющиеся значения, вызывается функция WithRepeat(). Данная функция принимает четыре значения: количество экспертов, количество факторов и два указателя на ранее созданные массивы. В данном случае необходима матрица с нестрогим ранжированием, которую необходимо объявить.

Далее изначальная матрица построчно анализируется для заполнения матрицы со строгим ранжированием. Для того, чтобы записывать строки начальной матрицы объявляется вспомогательный массив tmp и через два вложенных цикла определяются максимальные значения в строке. После каждым значениям присваиваются ранги с помощью вспомогательного счётчика на свои индексы в матрицу со строгим индексированием.

Следующим этапом созданы массивы O и S, которые заполняются расчётными данными, согласно формулам 3, 4:

$$O_i = \frac{\sum_{m=1}^{m} B_m}{m}, \quad (3)$$

где O_i – показатель обобщённого мнения экспертов; m – количество экспертов; B_m - величина оценки.

$$S = \sum_{m=1}^{m} R_m, \quad (4)$$

где S – сумма рангов оценок экспертов по факторам; R_m – ранги.

После заполнения массивов подсчитываются суммы O и S – osum и SUMRANG соответственно.

Для вычисления коэффициента конкордации в случае равных рангов необходимо дополнительно определить величину показателя равных рангов, поэтому с помощью объектов QList и QSet, вложенным циклам и вспомогательному массиву L (размерность массива L равна set), подсчитывается количество повторяющихся элементов. Определяется t_i – число повторений и суммирует их в SUMT. Все необходимые значения известны и, соответственно, считается коэффициент конкордации W.

На рис. 5 представлен листинг кода функции WithRepeat().

В случае отсутствия в строке значений с повторениями вызывается функция WithoutRepeat(). Набор параметров идентичен функции WithRepeat(). Изначально, заполняется массив со строгим ранжированием, так как иные массивы не требуется в виду того, что значения не повторяются, следовательно, производится расчёт только SUMRANG (считать osum не нужно, так как в конечной формуле данное значение не понадобиться). Производиться подсчёт dsum с помощью массива S. Все значения известны, поэтому производится вычисление коэффициента конкордации W.

На рис. 6 представлен листинг кода функции WithoutRepeat().

```
void MainWindow::WithRepeat(int m, int n, int **B_m, int **rang)
{
    double **rangED = new double*[n]();
    for (int i = 0; i < m; i++) rangED[i] = new double[n]();
    for(int i = 0; i < m; i++){
        int *tmp = new int[n]();
        QList<int> list;
        QSet<int> set;

        for(int j = 0; j < n; j++){
            tmp[j] = B_m[i][j];
            list.append(tmp[j]);
        }
        //set = QSet<int>(list.begin(), list.end());
        set = list.toSet();

        int max = 0, maxj = 0, count = 1;
        for(int j = 0; j < n; j++){
            for(int k = 0; k < n; k++){
                if(tmp[k] > max) {
                    max = tmp[k];
                    maxj = k;
                }
            }
            rang[i][maxj] = count;
            count++;
            tmp[maxj] = 0;
            max = maxj = 0;
        }
        count = 0;
        int SUMCount = 0;
        for (int k = 0; k < set.size(); k++){
            for (int l = 0; l < list.size(); l++){
                if (set.values().takeAt(k) == list[l]){
                    count++;
                    SUMCount += rang[i][l];
                }
            }
            for (int l = 0; l < list.size(); l++){
                if (set.values().takeAt(k) == list[l]){
                    rangED[i][l] = double(SUMCount) / double(count);
                }
            }
            count = SUMCount = 0;
        }
    }
    double *O = new double[n]();
    double *S = new double[n]();
    for(int i = 0; i < n; i++){
        double tmp = 0;
        for (int j = 0; j < m; j++){
            tmp += B_m[j][i];
            S[i] += rangED[j][i];
        }
        O[i] = tmp / m;
    }
    double SUMRANG = 0;
    for(int i = 0; i < n; i++) SUMRANG += S[i];
    SUMRANG /= n;
    double osum = 0;

    for (int i = 0; i < n; i++){
        osum += pow((SUMRANG - double(S[i])), 2);
    }
    int SUMT = 0;
    for (int i = 0; i < m; i++){
        QList<int> list;
        QSet<int> set;

        for (int j = 0; j < n; j++){
            list.append(B_m[i][j]);
        }
        set = list.toSet();
        int *L = new int[set.size()]();
        for(int k = 0; k < set.size(); k++){
            for (int l = 0; l < list.size(); l++){
                if(set.values().takeAt(k) == list[l]){
                    L[k]++;
                }
            }
            SUMT += int(pow(L[k],3)) - L[k];
        }
    }
    double W = 0;
    W = 12 / (pow(m, 2) * (pow(n, 3) - n) - m * SUMT) * osum;
    qDebug() << W;
}
```

Рис. 5. Листинг кода функции WithRepeat()

```
void MainWindow::WithoutRepeat(int m, int n, int **B_m, int **rang)
{
    for(int i = 0; i < m; i++){
        int *tmp = new int[n]();

        for(int j = 0; j < n; j++){
            tmp[j] = B_m[i][j];
        }

        int max = 0, maxj = 0, count = 1;
        for(int j = 0; j < n; j++){
            for(int k = 0; k < n; k++){
                if(tmp[k] > max) {
                    max = tmp[k];
                    maxj = k;
                }
            }
            rang[i][maxj] = count;
            count++;
            tmp[maxj] = 0;
            max = maxj = 0;
        }
    }
    double *O = new double[n]();
    int *S = new int[n]();
    for(int i = 0; i < n; i++){
        double tmp = 0;
        for (int j = 0; j < m; j++){
            tmp += B_m[j][i];
            S[i] += rang[j][i];
        }
        O[i] = tmp / m;
    }
    double SUMRANG = 0;
    for(int i = 0; i < n; i++) SUMRANG += S[i];
    SUMRANG /= n;
    double W = 0, dsum = 0;

    for (int i = 0; i < n; i++){
        dsum += pow((SUMRANG - double(S[i])), 2);
    }
    W = dsum * 12 / (pow(m, 2) * (pow(n, 3) - n));
    qDebug() << W;
}
```

Рис. 6. Листинг кода функции WithoutRepeat()

Выводы. Спроектированная система вполне применима в реальных условиях эксплуатации. Совершено функциональное тестирование системы, которое направлено на выявление и последующее устранение ошибок,

то есть протестированы все необходимые компоненты согласно поставленной задаче разработки ПО. В ходе тестирования проекта не было выявлено ошибок, что полностью соответствует предъявляемым требованиям.

Список литературы

1. Р 50.1.028-2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. 49 с.

2. Басовский Л.Е., Лунёва А.М., Басовский А.Л. Теория экономического анализа: учебное пособие. М.: Инфра-М, 2008. С. 32 - 34.

3. Баранова Е.М. Учебное пособие по дисциплине Информационные процессы и системы (Направления «Информационная безопасность»). Тула, ТулГУ, 2008. С. 12 - 15.

4. Орлов А.И. Экспертные оценки: учебное пособие. М., 2002. 31 с.

5. Шлее М. Qt 5.10. Профессиональное программирование на C++. М.: БХВ-Петербург, 2018. 1072 с.

6. Qt Documentation // Qt | Cross-platform software development for embedded & desktop. [Электронный ресурс] URL: https://doc.qt.io/ (дата обращения: 05.02.2020).

Кузьмин Илья Евгеньевич, студент, ea.naxuk@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Сафронов Алексей Александрович, студент, alekseysafronov0@gmail.com, Россия, Орёл, Орловский государственный университет,

Баранова Елизавета Михайловна, канд. техн. наук, доцент, elisafine@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Борзенкова Светлана Юрьевна, канд. техн. наук, доцент, tehnol@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DEVELOPMENT OF A COMPUTING SYSTEM DEGREE OF CONSISTENCY OF EXPERT OPINIONS IN THE FIELD OF INFORMATION SECURITY BY FINDING THE CONCORDANCE COEFFICIENT

I.E. Kuzmin, A.A. Safronov, E.M. Baranova, S.Yu. Borzenkova

The article describes the main stages of system design to determine the degree of consistency of opinions of experts in the field of information security by determining the concordance coefficient.

Key words: information security, information automated system, expert assessment, consistency of opinions, concordance coefficient.

Kuzmin Ilya Evgenievich, student, ea.naxuk@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Safronov Aleksey Aleksandrovich, student, alekseysafronov0@gmail.com, Russia, Oryol, Oryol State University,

Baranova Elizaveta Mikhailovna, candidate of technical science, docent, elisafine@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Borzenkova Svetlana Yurievna, candidate of technical science, docent, tehnol@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 69.051

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЗИМНЕГО БЕТОНИРОВАНИЯ ПОСРЕДСТВОМ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ «POTENCIAL-CWC»

А.А. Лапидус, А.О. Хубаев

Данная научная работа посвящена изучению и решению проблем организации процессов в области монолитного строительства, осуществляемого в зимний период. Актуальность темы исследования обоснована географическим положением и климатическими условиями нашей страны. Предметом исследования являются организационно-технологические решения при производстве зимнего бетонирования. Целью исследования являлось создание инструмента, позволяющего повысить эффективность производства зимнего бетонирования. И как положительный результат решения поставленных нами задач в данной работе представлено созданное программное обеспечение.

Ключевые слова: зимнее бетонирование, организационно-технологический потенциал, математическая модель, электронно-вычислительные машины, монолитное строительство.

В настоящее время производство монолитных железобетонных конструкций является неотъемлемой частью строительства, более того оно занимает лидирующие позиции на строительном рынке. Темпы строительства в России диктуют необходимость круглогодичного производства строительно-монтажных работ. В связи с чем, мы сталкиваемся с производством работ при отрицательных температурах окружающей среды. Это связано не только с климатическими особенностями в нашей стране, но и с ее географическим расположением.

Всем известен факт, что монолитные работы, проводимые при отрицательной температуре окружающей среды, сопровождаются различными сложностями и проблемами. Согласно нормативным документам, производство бетонных работ при среднесуточной температуре окружающей среды менее +5 градусов и суточной температуре ниже 0 градусов необходимо принимать специальные меры по выдерживанию уложенного в конструкции и сооружения бетона [1]. В связи с этим, происходит увеличение трудоемкости строительных работ, отставание от графика производства работ и увеличение сметной стоимости производимых работ, в сравнении с нормальными условиями окружающей среды.

Проблематике производства зимнего бетонирования было посвящено большое количество исследований, которые были отображены не только в опубликованных статьях, но и в монографиях ведущими учёными исследователями [2-4]. Сегодня основной задачей строителей является правильная и эффективная организация технологического процесса по бетонированию монолитных конструкций в зимний период, но на начальном этапе они сталкиваются с проблемами выбора наиболее эффективных организационно-технологических решений. Выбор данных организационно-технологических решений напрямую влияет на конечное качество строительной продукции. Задачей наших исследований было глубокое изучение проблем в этой сложной области.

Нами ранее было предложено создать инструмент, который бы позволил количественно и качественно оценить эффективность организационно-технологических решений, принятых при производстве зимнего бетонирования. В научном мире уже опубликовано большое количество статей об инновационном методе оценки организационно-технологической составляющей строительного проекта [11-18, 20-28]. Что, в свою очередь, достигается за счёт введения понятия «комплексный показатель эффективности» или «потенциал эффективности» [5, 6]. И в последствие получил широкое распространение в научном сообществе. Он послужил основой для многих исследований в различных областях строительной науки. Понятие «потенциал» характеризуется, как показатель, наглядно представляющий информацию о выбранном методе производства работ, в части технологии и организации. Мы в свою очередь применили данный инструмент в нашей узкой специализации. Результаты процесса исследований были опубликованы в ведущих научных журналах и представлены для обсуждения на конференциях. А итоговым результатом многолетних исследований стало создание программного обеспечения.

Основная часть. Нами была разработана программа, функционирующая в виде WEB (World Wide Web). Если быть более точным, то это математический аппарат, воспользоваться которым можно в интернет пространстве. При написании кода программного обеспечения в качестве языка программирования был выбран «Visual Basic». Также было решено создать и использовать свой домен [29]. Наш инструмент, как было сказано ранее, позволяет производить расчет потенциала организационно-технологических решений при производстве зимнего бетонирования. После проведения расчета, как результат, мы получаем оценку «Потенциала организационно-технологических решений при производстве зимнего бетонирования». Результатом будет являться появившееся в рабочем окне дискретное численное значение и психофизическая оценка согласно шкале желательности. Также мы предусмотрели, чтобы данным инструментом можно было бы пользоваться не только, используя персональный компьютер или ноутбук, но и при помощи смартфона. Для реализации данной идеи была проведена актуализация и адаптация интерфейса сайта под мобильную версию. Данная идея была продиктована условием частой невоз-

можности использования по разным причинам на строящемся объекте персонального компьютера или ноутбука с выходом в интернет. Смартфон же является неотъемлемым атрибутом современного человека.

Далее рассмотрим функциональные особенности программного обеспечения.

Пользование инструментом начинается с выбора типа строящегося здания (рис. 1). Выбор осуществляется из следующих позиций:

1. Малоэтажные здания;
2. Многоэтажные жилые здания;
3. Высотное строительство;
4. Сооружения (мачты, башни, градильни);
5. Сооружения промышленного назначения.

Разработанный инструмент адаптирован лишь для расчета потенциала при строительстве многоэтажных жилых зданий и сооружений промышленного назначения. Важно отметить, что в перспективе имеются намерения расширить охват его действия и на другие типы зданий. Именно это и является причиной указания трех других типов в появляющемся окне, несмотря на то, что на них пока не распространяется действие инструмента.

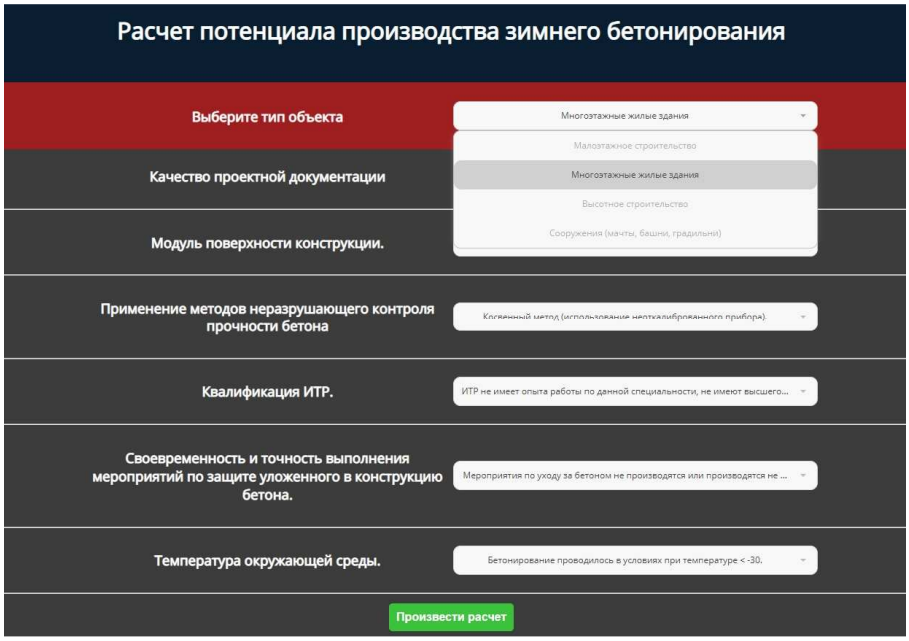


Рис. 1. Главная страница «Начало работы с программным обеспечением»

Следующим этапом является выбор необходимого значения каждого из 6 параметров (рис. 2), оказывающих влияние на конечный показатель. В качестве примера рассмотрим выбор соответствующего значения одного из параметров «Качество проектной документации». Нам дается возможностью выбора одного из 4 значений:

проектная документация имеется, но не согласована (в процессе согласования) и имеет много замечаний;

проектная документация разработана и согласована, но невозможно вести работы. Так как имеется мало информации. Условия строительства в проектной документации не соответствуют реальной ситуации на строительной площадке. Этот аспект не позволяет производить строительно-монтажные работы;

проектная документация имеется и согласована, но имеются замечания, которые могут быть устранены в период строительства. Данные замечания не окажут существенного влияния на производство работ;

проектная документация согласована, утверждена и находится на строительной площадке. А также она не имеет замечаний от инженерно-технического персонала и службы технического заказчика.

Каждое из четырех значений характеризуется своим весовым показателем.

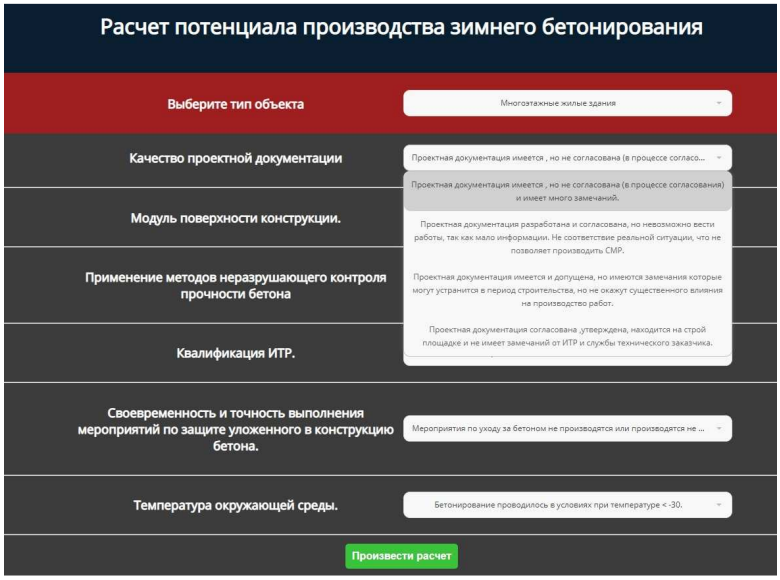


Рис. 2. Этап «Выбор значения 1 параметра»

После выбора соответствующих значений каждого из шести параметров, мы переходим к этапу расчета. На данном этапе мы нажимаем на кнопку «Произвести расчет». В результате мы получаем численное значение потенциала и его психофизическую оценку. Данная оценка позволяет нам охарактеризовать существующий потенциал строительной площадки и спрогнозировать возможность образования дефектов и недобора прочности возводимых монолитных конструкций (рис. 3). Достоверность прогнозной способности данного инструмента была пробирована и подтверждена на строящихся объектах. В свою очередь, дефекты требуют обязательного ремонта согласно нормативной документации, не говоря уже о том, что конструкции, не набравшие проектную прочность, не будут приняты службой технического заказчика для дальнейшей эксплуатации. Все это влечет нарушение сроков согласно графику производства работ, и, как следствие, удорожание строительных работ. В случае психофизической оценки «неудовлетворительно», «удовлетворительно» и «хорошо» мы можем повысить значение потенциала, воспользовавшись предложенными

нам рекомендациями. Соответствующее повышение повлечет за собой уменьшение риска возникновения дефектов. И, как итог, повышение качества конструкций. Что позволит исключить отставание работ согласно календарному графику.

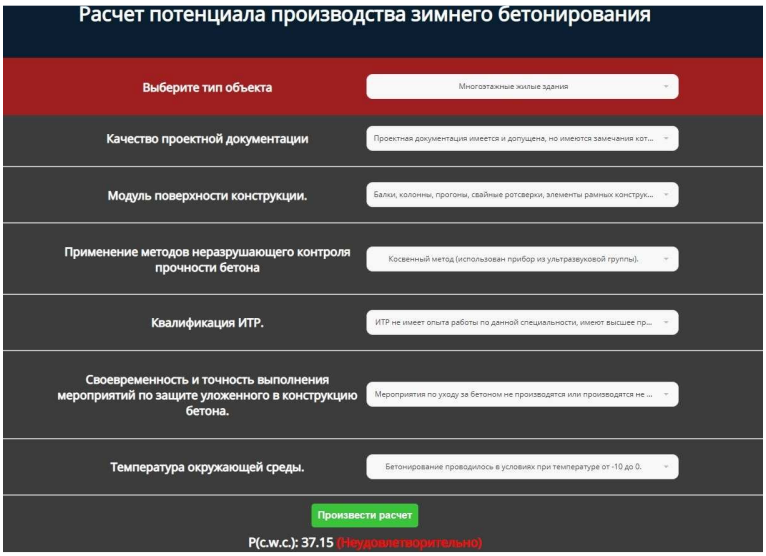


Рис. 3. Этап «Получение результата расчета»

На данном этапе после проведения расчета потенциала перед нами открывается окно с блоком (рис. 4). Данный блок включает в себя рекомендации по повышению показателей четырех параметров. Параметры «Температура окружающей среды» и «Модуль поверхности конструкции» после первоначального выбора значения остаются неизменными. В связи с этим, в открывшемся окне имеются лишь рекомендации по четырем параметрам. Далее происходит выбор новых значений параметров. Возможность выбора новых значений параметров отчасти диктуется имеющимися материальными и трудовыми ресурсами фирмы, осуществляющей строительно-монтажные работы. Вам необходимо будет выбрать новое значение повышаемого параметра, кликнув на «кружок», находящийся по левую сторону от выбранного вами названия параметра.

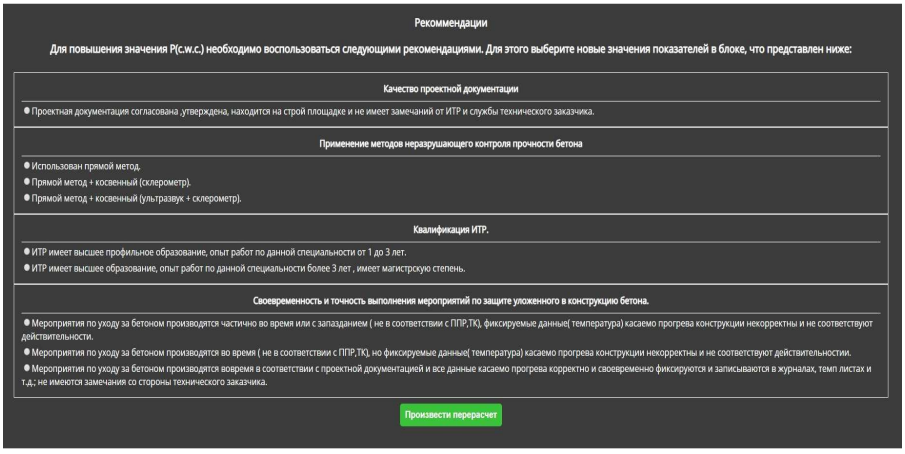


Рис. 4. Этап «Использование рекомендаций для повышения Потенциала»

На последнем этапе пользования программой вы после выбранных вами новых значений параметров нажимаете зеленую кнопку «Произвести перерасчет». В результате вы получаете новое повышенное значение потенциала (рис. 5). Если полученное значение вас не устраивает, вы можете его повысить, увеличив значения параметров, недоведенных до значения максимум. Конечно же, повышение значения до максимума требует соответствующих трудозатрат, не всегда оправданных с финансовой точки зрения.

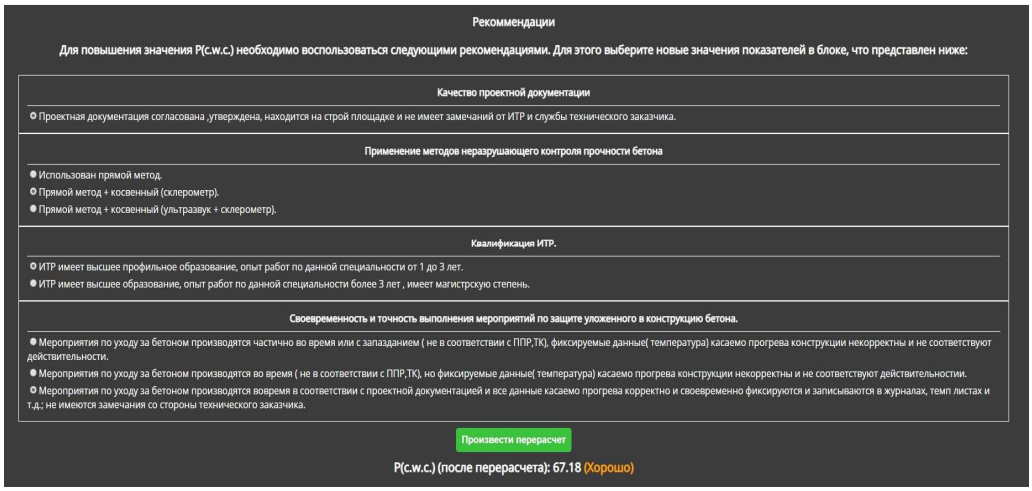


Рис. 5. Этап «Получение нового значения потенциала»

Заключение. Данный инструмент является результатом многолетней работы, осуществляемой в рамках написания диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ее основой послужило использование математического аппарата, описанного в ранее опубликованных научных работах [7, 8, 9]. Данная программа была апробирована на многих строящихся объектах, и показала положительный результат. Результаты применения также будут представлены в будущих работах. Данная программа получила свидетельство о государственной регистрации программы для Электронно-вычислительных машин в Федеральной службе по интеллектуальной собственности [25]. В наших планах присутствует дальнейшее исследование возможности оптимизации данного аппарата не только под остальные типы зданий и гражданских сооружений, но и под другие климатические условия. В дальнейшем также планируется изучение процесса внедрения современных технологий и возможностей компьютерной визуализации в область монолитного строительства [10, 19].

Список литературы.

1. СП 70.13330.2012 Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87 (с Изменениями N 1, 3) // Официальное изданием.: Госстрой, ФАУ "ФЦС", 2013 год, текст электронный.

2. Копылов В.Д. Устройство монолитных бетонных конструкций при отрицательных температурах среды: монография. Издательство АСВ. 2014. 180 с.

3. Афанасьев А.А., Данилов Н.Н., Копылов В.Д., Сысоев Б.В., Терентьев О.М. Технология строительных процессов // Промышленное и гражданское строительство. 1997. 464 с.

4. Тринкер А.Б. Зимнее бетонирование и работы в условиях вечной мерзлоты // Технологии бетонов. 2013. №2. С. 42 - 44.

5. Лапидус А.А. Формирование интегрального потенциала организационно-технологических решений посредством декомпозиции основных элементов строительного проекта // Вестник МГСУ. 2016. № 12. С. 114–121.

6. Лапидус А.А. Потенциал эффективности организационно-технологических решений строительного объекта // Вестник МГСУ. 2014. № 1. С. 175–180.

7. Лапидус А.А., Хубаев А.О. Формирование потенциала организационно-технологических решений использования методов бетонирования в условиях отрицательных температур // Наука и бизнес: пути развития. 2017. №11 (77). С. 7 – 11.

8. Хубаев А.О. Организационно-технологические решения, влияющие на конечный потенциал производства бетонных работ в зимний период // Перспективы науки. 2018. № 4 (103). С. 57-61.

9. Хубаев А.О. Описание эксперимента при расчете потенциала производства зимнего бетонирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 2. С. 247-252.

10. Хубаев А.О., Саакян С.С. Повышение эффективности возведения монолитных конструкций с применением технологии виртуальной и дополненной реальности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 12. С. 492-495.

11. Лапидус А.А., Говоруха П.А. Организационно-технологический потенциал ограждающих конструкций многоэтажных жилых зданий // Вестник МГСУ. 2015. № 4. С. 143–149.

12. Лапидус А.А., Макаров А.Н. Организационно-технологический потенциал ограждающих конструкций многоэтажных жилых зданий // Вестник МГСУ. 2015. № 8. С. 150–160.

13. Лапидус А.А., Фельдман А.О. Оценка организационно-технологического потенциала строительного проекта, формируемого на основе информационных потоков // Вестник МГСУ. 2015. № 11. С. 193–201.

14. Лапидус А.А, Демидов Л.П. Исследование факторов, влияющих на показатель потенциала строительной площади // Вестник МГСУ. 2014. № 4. С. 160–166.

15. Лапидус А.А, Бережный А.Ю. Математическая модель оценки обобщенного показателя экологической нагрузки при возведении строительного объекта // Вестник МГСУ. 2012. № 3. С. 149–153.

16. Сайдаев Х.Л.-А. Методика выбора строительной компании в рамках организации тендера на основе расчета комплексного показателя результативности // Вестник МГСУ. 2013. № 10. С. 266–271.

17. Лапидус А.А., Степанов А.О. Формирование организационно-технологических параметров эффективности возведения монолитных конструкций многоэтажных жилых зданий // Наука и бизнес: пути развития. 2019. №2 (92). С. 128 – 131.

18. Хубаев А.О., Бидов Т.Х. Организационно-технологический потенциал использования методов неразрушающего контроля при производстве бетонных работ в зимний период // Наука и бизнес: пути развития. 2018. №4. С. 101-104.

19. Хубаев А.О., Бидов Т.Х. Использование нанотехнологий при изготовлении бетона // Строительство – формирование среды жизнедеятельности // Сборник трудов XX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. 2017. С. 902-904.

20. Бидов Т.Х. Организационно-технологические и управленческие решения использования методов неразрушающего контроля при возведении монолитных конструкций // Научное обозрение. 2017. №13. С. 54-57.

21. Лапидус А.А., Бидов Т.Х. Формирование производственно-технологических модулей, обосновывающих использование методов неразрушающего контроля при возведении монолитных конструкций гражданских зданий // Наука и бизнес: пути развития. 2019. №1. С. 31-36.

22. Фатуллаев Р.С. Формирование параметров, влияющих на организационно-технологические решения при проведении внеплановых ремонтных работ // Перспективы науки. Тамбов: ТМБпринт. 2017. № 8(95). С. 33.

23. Лапидус А.А., Фатуллаев Р.С. Оценка параметрической базы организационно-технологического моделирования объекта, в котором планируется проведение внепланового капитального ремонта // Наука и бизнес: пути развития. М.: ТМБпринт. 2017. № 8(74). С. 25.

24. Топчий Д.В., Лапидус А.А., Хубаев А.О. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ №2019661940 12.09.2019. Расчет потенциала производства зимнего бетонирования при перепрофилировании промышленных объектов. Бюл. № 9.

25. Lapidus A., Bidov T., Khubaev A. The study of the calibration dependences used when testing the concrete strength by nondestructive methods // MATEC Web of Conferences. 2017. V. 117. P. 00094.

26. Lapidus A., Khubaev A., Bidov T. Organizational and technological solutions justifying use of non-destructive methods of control when building monolithic constructions of civil buildings and structures // MATEC Web of Conferences. 2019. V.251. P. 05014.

27. A. Lapidus, A. Khubaev, T. Bidov. Development of a three-tier system of parameters in the formation of the organizational and technological potential of using non-destructive testing methods // E3S Web of Conferences. 2019. V. 97. P. 06037.

28. Lapidus A., Bidov T. The Efficiency Potential Of Organizational, Technological And Managerial Solutions For Non-destructive Quality Control Methods In The Construction Of Monolithic Reinforced Concrete Structures // International Journal of Applied Engineering Research, 2016. Volume 11. P. 5972-5974.

29. Потенциал производства зимнего бетонирования [Электронный ресурс] URL: http://potentialcwc.ru/ (дата обращения: 10.11.2019).

Лапидус Азарий Абрамович, д-р техн. наук, заслуженный строитель РФ, лауреат Премии Правительства в области науки и техники, профессор, lapidus58@mail.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,

Хубаев Алан Олегович, старший преподаватель, alan_khubaev@mail.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

INCREASING THE EFFICIENCY OF WINTER CONCRETING PRODUCTION BY USING THE "POTENCIAL-CWC" SOFTWARE

A.A. Lapidus, A.O. Khubaev

This scientific work is devoted to the study and solution of problems of the organization of processes in the field of monolithic construction, which is carried out in the winter. The relevance of the research topic is justified by the geographical position and climatic conditions of our country. Organizational and technological solutions in the production of winter concreting are the subject of research. The aim of the study was to create a tool to improve the efficiency of production of winter concreting. The created software was presented in this work as a positive result of solving our tasks.

Key words: winter concreting, organizational and technological potential, mathematical model, electronic computers, monolithic construction.

Lapidus Azariy Abramovich, doctor of technical sciences, distinguished buldier of the Russian Federation, Winner of the PF Governmental Prize in Science and Technology, professor, lapidus58@mail.ru, Russia, Moscow, National research Moscow state University of civil engineering,

Khubaev Alan Olegovich, senior lecturer, alan_khubaev@mail.ru, Russia, Moscow, National research Moscow state University of civil engineering

УДК 621.317.39

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Н.С. Акиншин, А.В. Петешов, Д.Б. Смыляев, В.В. Манелюк

Предложен широкополосный классификатор, который является более мощным по сравнению с узкополосным, поскольку использует поляриметрическая информацию в различных частотных поддиапазонах. Результат вычисления вероятностей ошибок обнаружения целей для различных объемов обучающих выборок показал, что увеличение количества используемых для селекции малоразмерных наземных целей (МНЦ) поддиапазонов приводит к быстрому уменьшению ошибки классификации.

Ключевые слова: поляризационные характеристики, классификация целей, матрица рассеяния.

Поляриметрическая РЛС использует информацию о поляризациях падающих и обратно рассеянных волн, что означает использование полной векторной сигнальной информации об объекте. Эта многообразная информация описывается матрицей рассеяния $\vec{S}(f_k)$ цели, где f_k – несущая частота узкополосной импульсной РЛС. В зависимости от ширины полосы используемых частот различают узко - и широкополосные поляриметрические РЛС [1, 2].

Очевидно, что привлечение новой информации – о поляризационных характеристиках целей в широкой полосе частот, расширяет возможности поляриметрических РЛС по селекции малоразмерных наземных целей (МНЦ) на фоне подстилающих поверхностей. Вопросы классификации целей по поляризационной информации и оценки эффективности селекции при использовании узкополосных сигналов достаточно подробно рассмотрены в [2,3]. В типовом устройстве классификации обработка узкополосных сигналов осуществляется, как правило, в два этапа.

На первом этапе происходит оценка вектора характеристики $\vec{m}$ на основе вектора измерений $\vec{S}$, который затем используется как входной вектор на втором этапе обработки. На втором этапе первоначально вычисляется оценочный вектор, при этом используются достоверно выбранные оценочные функции $f_i(\vec{m}) = d_j$. На основе этого оценочного вектора в блоке решения формируется вектор решения $\vec{e} = (0,\ldots,1,\ldots,0)^T$, в котором значение 1 содержится только в векторном компоненте j, что означает принадлежность вектора характеристики $\vec{m}$ к данному классу, а в остальных – только 0.

Рассмотрим специальный классификатор, работа которого базируется на многомерных комплексных нормальных распределениях векторов сигналов класса $K\ S_j(K); K = K_0$.

Функции плотности нулевого вектора $S_j(K)$ класса j тогда будут [3,4]

$$d_j = \frac{1}{\pi^{\mu} \det(\vec{J}_j)} * e - \vec{s}^{\,*T_{\vec{J}_j^{-1}\vec{s}}}; j = 1,\ldots K. \quad (1)$$

где μ=величине ($\vec{S}$).

Можно использовать следующие оценочные функции для вычисления компонентов оценочного вектора

$$d_j = \vec{s}^{*T} \vec{J}_j^{-1} \vec{s} + \ln(\det(\vec{J}_j)) - \ln(P_j); j = 1,\ldots K. \quad (2)$$

Связанная с ними функция решения принимает вид

$$\vec{e}_j(\vec{d}) = \begin{cases} 1 \quad при \quad d_j = \min(d_\eta) \\ \qquad\qquad \eta \\ 0 \quad при \quad других\ значениях \end{cases}. \quad (3)$$

В выражении (2) использована квадратичная форма

$$\Omega_j = \vec{s}^{*T} J_j^{-1} \vec{s},$$

которая может быть преобразована при использовании принципа декомпозиции по векторам $\vec{A}$ и $\vec{B}$ к следующему виду

$$d_j = \vec{A}_j^T \vec{B} + \ln(\det(\vec{J}_j)) - \ln(P_j); j = 1,\ldots K, \quad (4)$$

где

$$\Omega_j = A_j^T B; \quad (5)$$

$$\vec{J}_j^{-1} = \sum_{\alpha=1}^{15} A_{j\alpha} \vec{\eta}_\alpha;\ \vec{J} = \vec{s} \cdot \vec{s}^{*T} = \sum_{\alpha=1}^{15} B_\alpha \vec{\eta}_\alpha; \quad (6)$$

$$A_{j\alpha} = \frac{1}{2} \cdot trace(\vec{J}_j^{-1} \cdot \vec{\eta}_\alpha);\ B_\alpha = \frac{1}{2} \cdot trace(\vec{J} \cdot \vec{\eta}_\alpha). \quad (7)$$

Выражение (4) вычисляет скалярное произведение вектора $\vec{A}$, представляющего инверсию матрицы когерентности $\vec{J}_j$, и вектора $\vec{B}$, который рассчитывается на основе вектора матрицы рассеяния (МР) $\vec{S}$.

По сравнению с узкополосным классификатором, который использует один вектор МР в качестве исходной информации широкополосный классификатор может использовать всю последовательность векторов МР $\vec{S}; k = 1\ldots, N$. На базе широкополосного сигнала можно описать стохастический сигнал, используя $\Lambda = N / L$ поддиапазоны. В этом случае каждый класс j характеризуется Λ корреляционными матрицами $J_j; j = 1,\ldots, \Lambda$. На первом этапе можно вычислить специфические оценочные функции поддиапазонов, обусловленные каждым классом j, которые совместно формируют вектор выбора решения $\vec{d}$ [4, 5]

$$\vec{d}_{jl} = \vec{A}_{jl}^T \vec{B}_l + \ln(\det(\vec{J}_{jl})) - \ln(P_j); j = 1,\ldots K; l = 1,\ldots, \Lambda; \quad (8)$$

где $\Omega_{jl} = A_{jl}^T B_l$;

$$\vec{J}_{jl}^{-1} = \sum_{\alpha=1}^{15} A_{jl\alpha}\vec{\eta}_\alpha;\ \vec{J}_l = \frac{1}{L}\sum_{k=(l-1)L+1}^{lL} \vec{s}(k)\cdot\vec{s}^{*T}(k) = \sum_{\alpha=1}^{15} B_{l\alpha}\cdot\vec{\eta}_\alpha; \quad (9)$$

$$A_{jl\alpha} = \frac{1}{2}\cdot trace(\vec{J}_{jl}^{-1}\cdot\vec{\eta}_\alpha);\ B_{l\alpha} = \frac{1}{2}\cdot trace(\vec{J}_l\cdot\vec{\eta}_\alpha). \quad (10)$$

Используя решающее правило (3) можно рассчитать специфические вектора решений $\vec{e}_l$ для поддиапазонов. В качестве промежуточного результата получаем последовательность нормализованных векторов оценки и решений

$$\left(\frac{\vec{d}_l}{\|\vec{d}_l\|}, \vec{e}_l\right); l = 1,\ldots,\Lambda. \quad (11)$$

На следующем этапе обработки на основе полученных векторов рассчитываются общий одиночный вектор $\vec{D}$ и общий вектор решения $\vec{E}$ при привлечении тщательно отобранных правил объединения. С помощью операций комбинирования можно рассчитать взвешенную сумму компонентов вектора решения, принадлежащему поддиапазону

$$D_{1j} = \sum_{l=1}^{\Lambda} W_l e_{jl}, \quad (12)$$

$$D_{2j} = \sum_{l=1}^{\Lambda} W_l d_{jl}. \quad (13)$$

Весовые коэффициенты могут быть подобраны различными способами, например

$$W_l = \frac{1}{\Lambda}. \quad (14)$$

Предложенный широкополосный классификатор является более мощным по сравнению с узкополосным, поскольку использует поляриметрическая информацию в Λ частотных поддиапазонах, что позволяет повысить достоверность селекции целей. Корректность высказанного предположения была подтверждена результатами статистического эксперимента по методу Монте-Карло [5,6]. Из нормальных совокупностей с параметрами m_{ijl}, σ_{li}, полученными в соответствии с экспериментальными данными, извлекалось несколько обучающих выборок объемом порядка 500 значений каждая, после чего вычислялись выборочные оценки $\hat{m}_{ijl}$, $\hat{\sigma}_{li}$ параметров m_{ijl}, σ_{li}.

Далее из совокупностей классифицируемых классов Ω_1, Ω_2 для каждого класса j, j = 1,2 и частотного поддиапазона l генерировалось p контрольных выборок объемом n_p.

Выборочные значения вектора признаков из Ω_1 предъявлялись классификатору, функционирующему в соответствии с правилом (3), после чего подсчитывалось число A_k нарушений неравенства, т.е. число ошибок классификации. Тогда частота ошибочной классификации выборок из совокупности Ω_1 к классу Ω_2 примет вид

$$P_{1k} = A_k / k .$$

Усредняя полученные оценки по всему множеству обучающих выборок, находим $P_1 = \frac{1}{M}\sum_{k=1}^{M} P_{1k}$. Аналогично, классифицируя контрольные выборки из Ω_2 и подсчитывая $\hat{P}_{2k}$, получаем оценку вероятности ошибки классификации второго рода $\hat{P}_2$ Подобные расчеты проводились при разных уровнях отношения сигнал/шум $P_c / P_ш$.

Результат вычисления вероятностей ошибок обнаружения целей для различных объемов обучающих выборок и количества используемых поддиапазонов l, полученный в результате статистического эксперимента, показал, что увеличение количества используемых для селекции МНЦ поддиапазонов приводит к быстрому уменьшению ошибки обнаружения. Аналогичная тенденция наблюдается при увеличении объема обучающих выборок. Результаты оценки зависимости вероятностей ошибок обнаружения $\hat{P}_2$ от соотношения сигнал/шум $P_c / P_ш$, полученных методом статистического моделирования свидетельствуют о том, что при использовании сверхширокополосных сигналов (число поддиапазонов i =4…5) приемлемый уровень вероятности ошибочного обнаружения ($\hat{P}_2 \le 0{,}05$) будет достигнут при соотношении сигнал/шум $P_c / P_ш$, меньшем на 3-5 дБ по сравнению с использованием узкополосного сигнала.

Список литературы

1. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации: учебное пособие для вузов. М.: Радио и связь. 1992. 304 с.

2. Варганов М.Е., Зиновьев Ю.С., Астанин Л.Ю. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / под ред. Л.Т. Тучнова. М.: Радио и связь, 1985. 236 с.

3. Фомин Я.А., Тарловский Г.Р. Статистическая теория распознавания образов. М.: Радио и связь, 1986. 164 с.

4. Родимов А.П., Поповский В.В. Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов и помех. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.

5. Boerner W.M., Huynen J.R., Mathur N.C. Polarization in radar target reconstruction // Final report the University of Jllinois at Chicago. 1983.

6. Джули Д. Поляризационное разнесение в радиолокации // ТИИЭР. 1986. Т. 74. N 2. С. 6 - 34.

Акиншин Николай Степанович, д-р техн. наук, профессор, начальник отдела, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тула, АО Центральное конструкторское бюро аппаратостроения,

Петешов Андрей Викторович, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры, D-john_post@mail.ru, Россия, Череповец, Череповецкое высшее военное инженерное ордена Жукова училище радиоэлектроники,

Смыляев Денис Борисович, адъюнкт, cdbae@cdbae.ru, Россия, Пенза, Пензенский артиллерийский инженерный институт имени Н.Н. Воронова,

Манелюк Владислав Владимирович, инженер, cdbae@cdbae.ru, Россия, Анапа, ВИТ «ЭРА»

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF POLARIZATION RECOGNITION OF SMALL-SIZED GROUND OBJECTS USING ULTRA-WIDE-BAND RADAR SIGNALS

N.S. Akinshin, A.V. Peteshov, D.B. Smilyaev, V.V. Maneluk

A broadband classifier is proposed that is more powerful than a narrowband classifier because it uses polarimetric information in different frequency sub-bands. The result of calculating the probabilities of target detection errors for different volumes of training samples showed that an increase in the number of sub-ranges used for selection of small-sized ground targets (MSCS) leads to a rapid decrease in the classification error.

Key words: polarization characteristics, target classification, scattering matrix.

Akinshin Nikolay Stepanovich, doctor of technical Sciences, professor, head of Department, cdbae@cdbae.ru, Russia, Tula, JSC Central Design Bureau of Apparatus Engineering,

Peteshov Andrey Viktorovich, candidate of technical sciences, professor, head of the Department, D-john_post@mail.ru, Russia, Cherepovets, Cherepovets Higher Military Engineering Order of Zhukov School of Radio Electronics,

Smilyaev Dennis Borisovich, adjunct, cdbae@cdbae.ru, Russia, Penza, Penza Artillery Engineering Institute named after N.N. Voronova,

Maneluk Vladislav Vladimirovich, engineer, cdbae@cdbae.ru, Russia, Anapa, VIT «ERA»

УДК 620.17

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМИТАТОРОВ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА НА СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

М.В. Житный, Т.Ю. Девяткина, Т.С. Хубларова, И.С. Прохватова

Рассмотрен порядок определения электрических характеристик солнечных элементов, используемых в солнечных батареях космических аппаратов. Приведен порядок определения коэффициентов деградации, характеризующих изменение электрических характеристик, которое возникает при повреждении солнечных элементов в результате ударного воздействия малоразмерных твердых частиц.

Ключевые слова: солнечный элемент, электрическая характеристика, коэффициент деградации, ударное воздействие, космический мусор.

В настоящее время все более актуальной становится проблема оценивания ударного воздействия малоразмерных твердых частиц на элементы космических аппаратов. Это обусловлено значительным увеличением числа твердых частиц, имеющих различные размеры, а также фрагментов ракетно-космической техники, находящихся на наиболее востребованных околоземных орбитах. Проведенные исследования показали, что защита космического аппарата (КА) от высокоскоростных твердых частиц диаметром более 10 мм нецелесообразна в силу большой энергии, которой обладают такие частицы. Так, например, в результате экспериментов установлено, что имитатор твердой частицы диаметром 2 мм, имеющий скорость 1,8 км/с и массу порядка 32 мг, внедряется в пластину, изготовленную из АМг3, на глубину, равную четырем его диаметрам [1]. А алюминиевая частица размером 1 мм имеет энергию эквивалентную летящему со скоростью 100 км/ч 160-килограммовому сейфу [2]. Наличие высокой энергии у таких, достаточном малых частиц, обусловлено большими относительными скоростями встречи, которые имеют место в околоземном пространстве.

Вместе с тем, следует отметить, что повреждение некоторых элементов КА, возникающее в результате таких соударений, не приводит к немедленному выводу из строя КА. Одним из таких элементов является солнечная батарея (СБ).

Солнечная батарея входит в состав системы электроснабжения КА и, в большинстве случаев, является первичным источником энергии. В условиях постоянно растущих требований к мощности, обеспечиваемой системой электроснабжения, снижение первичного источника энергии приведет к сокращению времени активного существования КА. Одной из причин, приводящих к ухудшению электрических характеристик СБ, является повреждение солнечных элементов, входящих в состав СБ, в результате ударного воздействия частиц космического мусора. Так, например, анализ опыта эксплуатации солнечных батарей служебного модуля МКС,

показал, что в результате повреждения частицами космического мусора трех створок одного из генераторов СБ произошло снижение суммарного генерируемого тока на 5% [3]. Изложенные выше обстоятельства определяют актуальность проведения исследований по моделированию ударного воздействия имитаторов частиц космического мусора на солнечные элементы СБ и оцениванию изменения их электрических характеристик, в результате полученных повреждений.

Предлагаемая методика разработана в рамках проведения экспериментальных исследований по оцениванию изменения электрических характеристик солнечных элементов, входящих в состав солнечных батарей, применяемых на КА, в результате ударного воздействия имитаторов частиц космического мусора (ЧКМ) в условиях искусственного солнечного излучения. Методика предназначена для определения электрических характеристик солнечных элементов (СЭ) до и после воздействия имитатора ЧКМ, к которым относятся напряжение холостого хода, плотность тока короткого замыкания, удельная максимальная мощность, напряжение в точке максимальной мощности, плотность тока в точке максимальной мощности, а также соответствующих им коэффициентов деградации.

При разработке методики, приняты следующие допущения и ограничения:

спектральная чувствительность применяемого эталонного прибора соответствует спектральной чувствительности испытываемого солнечного элемента;

конструкция испытываемого образца СЭ идентична конструкции эталонного прибора в отношении размера и электрических характеристик и подразумевает аналогичный тип применяемых элементов и схему их соединения;

в силу небольшой площади эталонного прибора и испытываемого образца относительно рабочей области имитатора солнечного излучения, а также условия их размещения в лабораторной установке в непосредственной близости друг от друга значение энергетической освещенности эталонного прибора и испытываемого образца равны и равномерны по всей поверхности испытываемого образца;

в качестве имитаторов частиц космического мусора используются металлические (алюминиевые или стальные) ударники шарообразной формы диаметрами 1…14,3 мм.

В ходе экспериментальных исследований применяются следующие лабораторные установки, обеспечивающие получение требуемых статистических данных об электрических характеристиках СЭ до и после ударного воздействия имитатора ЧКМ:

экспериментальный баллистический комплекс БС-3, предназначенный для моделирования ударного воздействия на СЭ частицы космического мусора, включающий легкогазовые установки [4] и пневматическую метательную установку, которые обеспечивают получение скоростей имитаторов ЧКМ в диапазоне от 0,1 до 5 км/с;

экспериментальный измерительный стенд, предназначенных для определения вольт-амперных характеристик (ВАХ) тестируемых образцов солнечных элементов.

В состав экспериментального измерительного стенда входят следующие приборы [5, 6]:

эталонный фотоэлектрический прибор, соответствующий характеристикам испытываемого образца в требуемых диапазонах энергетической освещенности (ЭО), спектрального распределения и температур;

средства измерения температуры эталонного прибора и испытываемого образца;

имитатор солнечного излучения, рабочая зона измерений которого превышает зону, занимаемую испытываемым образцом;

термостабилизирующее устройство, предназначенное для поддержания постоянной температуры испытываемого образца, и включающее в себя датчик температуры (с точностью определения $\pm 1^0$C) устройство охлаждения;

спектрорадиометр;

электронная программируемая нагрузка типа АТН-8120 с напряжением питания до 120 В, током нагрузки до 240 А, потребляемой мощностью до 1200 Вт, предназначенная для обеспечения снятия ВАХ испытываемого образца СЭ.

Измерения ВАХ испытываемых образцов проводятся при следующих условиях испытаний [5, 7]:

температура испытываемого образца, ^{O}C: 25±1;

энергетическая освещенность, Вт/м^2: 1360 ±1%;

световой поток направлен нормально к воспринимающей поверхности с отклонениями не более $\pm 2^{O}$;

спектральный состав имитатора солнечного излучения в соответствии с [8].

В общем случае методика заключается в выполнении следующих основных этапов:

– настройка экспериментального измерительного стенда, которая включает калибровку имитатора солнечного излучения, выверку углов установки эталонного фотоэлектрического прибора и испытываемого образца, проверку правильности калибровки средства измерения температуры эталонного прибора и испытываемого образца, проверки функционирования измерительной аппаратуры;

помещение в экспериментальный измерительный стенд испытываемого образца и его термостабилизация;

измерение вольт-амперных характеристик и температуры испытываемого образца в соответствии с требованиями [5] с занесением полученных результатов измерений в протокол испытаний;

проведение ударного воздействия на исследуемые образцы на экспериментальном баллистическом комплексе БС-3, заключающегося в ударном повреждении образца;

помещение в экспериментальный измерительный стенд испытываемого образца и его термостабилизация;

определение ВАХ исследуемого образца после испытания с занесением полученных результатов измерений в протокол испытаний;

определение коэффициентов деградации характеристик солнечного элемента;

обработка результатов измерений.

Общий порядок определения ВАХ в условиях непрерывного искусственного солнечного излучения соответствует требованиям [5] и заключается в проведении следующих основных этапов:

калибровка эталонного фотоэлектрического прибора при стандартных условиях измерения в соответствии с требованиями [6];

установка эталонного фотоэлектрического прибора в лабораторную установку и его термостабилизация на уровне температуры окружающей среды с отклонением в пределах $\pm 1^0$C;

настойка имитатора солнечного излучения для условий, когда размеры испытываемых образцов соответствуют используемому эталонному прибору;

установка испытываемого образца, подключение его к измерительному оборудованию и проведение термостабилизации образца;

измерение ВАХ образца (в случае необходимости также измеряется температура испытываемого образца);

ток короткого замыкания и напряжение холостого хода эталонного прибора.

Результаты полученных измерений сводятся в протокол испытаний, который оформляется в соответствии с требованиями [5].

Расчёт коэффициентов деградации электрических характеристик СЭ проводится с использованием следующих зависимостей:

– коэффициент деградации плотности тока короткого замыкания

$$k_{J\text{к.з}} = \frac{J_{\text{к.з}}^{\text{возд}}\left(X_{\text{возд}}\right)}{J_{\text{к.з}}^{0}},$$

где $J_{\text{к.з}}^{\text{возд}}$ – плотность тока короткого замыкания СЭ после испытаний; $X_{\text{возд}}$ – параметры ударника; $J_{\text{к.з}}^{0}$ – плотность тока короткого замыкания СЭ до испытания.

коэффициент деградации напряжения холостого хода

$$k_{U_{\text{х.х}}} = \frac{U_{\text{х.х}}^{\text{возд}}\left(X_{\text{возд}}\right)}{U_{\text{х.х}}^{0}},$$

где $U_{\text{х.х}}^{\text{возд}}$ – напряжение холостого хода СЭ после испытания; $X_{\text{возд}}$ – параметры ударника; $U_{\text{х.х}}^{0}$ – напряжение холостого хода СЭ до испытания.

коэффициент деградации плотности тока в точке максимальной мощности

$$k_{J_{P\max}} = \frac{J_{P\max}^{\text{возд}}\left(X_{\text{возд}}\right)}{J_{P\max}^{0}},$$

где $J_{P\max}^{\text{возд}}$ – плотность тока короткого замыкания СЭ в точке максимальной мощности после испытания; $X_{\text{возд}}$ – параметры ударника; $J_{P\max}^{0}$ – плотность тока короткого замыкания СЭ в точке максимальной мощности до испытания.

коэффициент деградации напряжения в точке максимальной мощности

$$k_{U_{P\max}} = \frac{U_{P\max}^{\text{возд}}\left(X_{\text{возд}}\right)}{U_{P\max}^{0}},$$

где $U_{P\max}^{\text{возд}}$ – напряжение холостого хода СЭ в точке максимальной мощности после испытания; $X_{\text{возд}}$ – параметры ударника; $U_{P\max}^{0}$ – напряжение холостого хода СЭ в точке максимальной мощности до испытания.

коэффициент деградации максимальной мощности

$$k_{P\max} = \frac{P_{\max}^{\text{возд}}\left(X_{\text{возд}}\right)}{P_{\max}^{0}},$$

где $P_{\max}^{\text{возд}}$ – максимальная мощность СЭ после испытания; $X_{\text{возд}}$ – параметры ударника; $P_{\max}^{0}$ – максимальная мощность СЭ до испытания.

Обработка полученных результатов измерений проводится с учетом требований [9] и включает следующие этапы.

1. Вычисление оценки измеряемой величины и среднего квадратического отклонения результатов измерений.

Оценка измеряемой величины определяется по следующей зависимости:

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i ,$$

где x_i – измеренное значение исследуемого параметра (напряжение холостого хода, ток короткого замыкания и т.д.); n – количество измерений, принятых для обработки.

Среднее квадратическое отклонение группы, содержащей n результатов измерений, вычисляют с использованием следующего выражения:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}.$$

Среднее квадратическое отклонение оценки измеряемой величины, определяют по формуле

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}.$$

2. Исключение грубых погрешностей.

Исключение грубых погрешностей измерений проводится с использованием критерия Граббса. Для этого вычисляются значения критерия Граббса для максимального и минимального результата измерений в предположении, что данные результаты измерений вызваны грубыми погрешностями:

$$G_1 = \frac{\left|x_{\max} - \bar{x}\right|}{S_x};\ G_2 = \frac{\left|x_{\min} - \bar{x}\right|}{S_x},$$

где G_1 – критерий Граббса для максимального результата измерений; G_2 – критерий Граббса для минимального результата измерений.

Если выполняется условие $G_1 > G_T$ ($G_2 > G_T$), то данное максимальное (минимальное) значение результата измерений считается маловероятным и исключается из итоговой выборки результатов измерений. Величину критического значения критерия Граббса выбирают в соответствии с [9].

3. Проверка гипотезы о нормальности распределения результатов измерений.

Доверительные границы случайной погрешности оценки измеряемой величины в настоящей методике устанавливаются исходя из выполнения условиях о принадлежности полученной совокупности результатов измерений нормальному распределению. При числе измерений $15 \le n \le 50$ проверка выполнения данного условия осуществляется с использованием составного критерия, имеющего следующий вид:

$$\begin{cases} d_{1-q/2} \le \tilde{d} \le d_{q/2} \\ |A| \le m,\ A \in X \end{cases},$$

где $\tilde{d} = \dfrac{\sum_{i=1}^{n}\left|x_i - \bar{x}\right|}{\sqrt{n \cdot \sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}}$; $d_{1-q/2}$ $(d_{q/2})$ – квантили распределения для заранее выбранного уровня значимости; X – множество, содержащее совокупность значений разностей $(x_i - \bar{x})$; A – множество, для каждого из чле-

нов которого выполняется условие $x_i - \overline{x} > z_{p2} \cdot S_x$; z_{p2} – верхний квантиль распределения нормированной функции Лапласа, определяемый для заданного значения вероятности; m – критическое значение критерия, приведенное в [9].

В случае выполнения критерия (10) полученные результаты измерений считаются соответствующими нормальному закону распределения случайных величин.

4. Определение доверительной границы случайной погрешности оценки измеряемой величины.

Модуль доверительной границы случайной погрешности оценки измеряемой величины определяется на основании критерия Стьюдента, по следующей зависимости:

$$\varepsilon = t \cdot S_{\overline{x}},$$

где ε – модуль доверительной границы случайной погрешности оценки измеряемой величины; t – коэффициент Стьюдента, определяемый в зависимости от доверительной вероятности и числа результатов измерений.

5. Определение доверительных границ неисключенной систематической погрешности.

Неисключенная систематическая погрешность оценки измеряемой величины обусловлена наличием таких факторов как погрешности метода измерения, средств измерения и т.п.

Порядок определения неисключенной систематической погрешности оценки измеряемой величины, принятый в данной методике, соответствует порядку, изложенному в [9]. При этом доверительная вероятность для вычисления границ данной погрешности, принимается такой же, как и значение доверительной вероятности при вычислении доверительных границ случайной погрешности результата измерений.

6. Вычисление доверительных границ погрешности оценки измеряемой величины.

Окончательное значение доверительных границ погрешности измеряемой величины, вычисляется на основании следующего выражения:

$$\Delta = K \cdot S_{\Sigma},$$

где K – коэффициент, зависящий от соотношения случайной составляющей погрешности и неисключенной систематической погрешности; S_{Σ} – суммарное среднеквадратическое отклонение оценки измеряемой величины.

Значение коэффициента K определяют по следующей эмпирической зависимости:

$$K = \frac{\varepsilon \cdot \Theta_{\Sigma}}{S_{\overline{x}} + S_{\Theta}},$$

где Θ_{Σ} – границы неисключенной систематической погрешности; S_{Θ} – среднее квадратическое отклонение неисключенной систематической погрешности.

Таким образом, решение задачи оценивания воздействия частиц космического мусора на солнечные элементы космических аппаратов и вызванного этим воздействием изменения их электрических характеристик является актуальной. Кроме того, использование в настоящее время небольших по размеру космических аппаратов, оснащенных сравнительно малыми солнечными батареями и небольшими вторичными источниками электрической энергии, усложняет задачу функционирования таких КА в случае повреждения СБ в результате воздействия ЧКМ. Поэтому задача прогнозирования характеристик СБ в результате частичного повреждения входящих в нее солнечных элементов является важной практической задачей. Предлагаемая методика позволяет получить оценки изменения электрических характеристик солнечных элементов КА, возникающих при повреждении данных элементов, в ходе экспериментального моделирования. Методика является универсальной и может применяться для различных размеров имитаторов ЧКМ и солнечных элементов. Кроме того, порядок экспериментальных исследований, изложенный в методике, может быть применен для лабораторных установок другого типа. Получаемые в результате экспериментального моделирования значения коэффициентов деградации электрических характеристик солнечных элементов, позволяют проводить оценивание изменения данных характеристик в условиях частичного повреждения солнечных элементов и, как следствие, прогнозировать время активного существования КА.

Список литературы

1. Гончаров П.С., Житный М.В. Результаты экспериментальных исследований высокоскоростного удара по алюминиево-магниевому сплаву // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 11. С. 100–105.

2. Вениаминов С.С. Космический мусор – угроза человечеству. М.: ИКИ РАН, 2010. 207с.

3. Зернов А.С., Николаев В.Д. Опыт эксплуатации солнечных батарей служебного модуля международной космической станции // Космическая техника и технологии, 2016. Вып. 1(12). С. 29–38.

4. Мартынов В.В., Житный М.В. Конструкция легкогазовой установки с демпфирующими элементами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 12. Ч.1. С. 124–131.

5. ГОСТ Р МЭК 60904-1-2013. Приборы фотоэлектрические. Измерение вольтамперных характеристик. М., 2014. Ч. 1. 12 с.

6. ГОСТ Р МЭК 60904-2-2013. Приборы фотоэлектрические. Требования к эталонным солнечным приборам. М., 2014. Ч. 2. 15 с.

7. ГОСТ Р 56980-2016. Модули фотоэлектрические из кристаллического кремния наземные. Методы испытаний. М., 2016. 85 с.

8. ГОСТ Р МЭК 60904-3-2013. Приборы фотоэлектрические. Принципы измерения характеристик фотоэлектрических приборов с учетом стандартной спектральной плотности энергетической освещенности наземного солнечного излучения. М., 2016. Часть 3. 89 с.

9. ГОСТ Р 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. М., 2013. 19 с.

Житный Михаил Владимирович, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, mikelen2@rambler.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Девяткина Татьяна Юлиановна, младший научный сотрудник, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Хубларова Татьяна Сергеевна, научный сотрудник, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского,

Прохватова Ирина Станиславовна, научный сотрудник, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

EXPERIMENTAL SIMULATION METHODOLOGY OF SHOCK IMPACT WITH SPACE DEBR PARTICLES SIMULATORS ON SOLAR ELEMENTS

M.V. Zhitnyy, T.Y. Devyatkina, T.S. Hublarova, I.S. Prohvatova

The procedure for determining the electrical characteristics of solar cells used in solar panels of spacecraft is considered. The order of determining the degradation coefficients characterizing the change in electrical characteristics that occurs when solar cells are damaged as a result of the impact of small-sized solid particles is given.

Key words: solar cell, electrical characteristic, degradation coefficient, shock, space debris.

Zhitnyy Mihail Vladimirovich, candidate of technical science, docent, senior researcher, mikelen2@rambler.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Devyatkina Tatiana Yulianovna, junior researcher, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Hublarova Tatyana Sergeevna, researcher, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Prohvatova Irina Stanislavovna, researcher, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy

УДК 004.67; 621.3.049.77

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ДОКУМЕНТООБОРОТА В СОСТАВЕ САПР «КОВЧЕГ»

В.И. Алёшина, С.В. Гаврилов, Ю.С. Болотин

В статье проведён анализ способов электронного документооборота и выявлены их недостатки, выбраны инструментальные средства, разработана схема алгоритма программного модуля. В результате исследования был разработан программный модуль, призванный устранить указанные недостатки. Планируется, что разработка сократит время от начала проектирования до производства микросхем.

Ключевые слова: микросхема, электронный документооборот, измерение БИС, САПР «Ковчег», документация БИС.

На данный момент одним из наиболее важных направлений при производстве больших интегральных схем (БИС) является уменьшение времени разработки и производства микросхем за счет модернизации отечественных средств автоматизированного проектирования с целью повышения производительности, качества и сложности разработанных микросхем. В том числе, за счет совершенствования системы электронного документооборота.

Во время проектирования микросхем используется множество программ, которые решают те или иные задачи при разработке БИС. Это могут быть разработка поведенческой модели будущей БИС, разработка логического проекта, разработка топологии, разработка функциональных и контрольно-диагностических тестов. На завершающей стадии проектирования БИС проект состоит из топологии микросхемы, которая используется при изготовлении комплекта фотошаблонов, необходимых для последующего изготовления БИС, и контрольно-диагностических тестов, которые используются при разбраковке кристаллов БИС в составе пластины и микросхем в корпусе. При этом требуется выполнять большой спектр измерений. Измеряются параметры микросхемы такие, как: статические параметры — токи потребления, токи утечек, нагрузочные способности выходов микросхем, динамические параметры – быстродействие микросхемы. Для этого используется специальное контрольно-измерительное оборудование. Далее, при соответствии полученных результатов требованиям заказчика и ГОСТам, инженером составляется конструкторская документация на разработанную БИС [1].

Документация включает в себя результаты измерений вышеуказанных параметров на высококлассном и высокоточном оборудовании для проверки заявленной функциональности, а именно диагностический, параметрический и функциональный контроли на имеющимся в распоряжении разработчика оборудовании.

Диагностический контроль — это частный случай проверки микросхем. Максимально эффективен для тестирования гибридных интегральных схем.

Функциональный контроль подразумевает измерение статистических и динамических параметров микросхемы, основываясь на контрольно-тестовой таблице.

Параметрический контроль основан на измерении постоянного тока и выходных электрических сигналов [2].

Описанная концепция используется и на производстве в Научно-производственном комплексе «Технологический центр» (НПК «Технологический Центр»).

Очевидно, подготовка документации – один из главных пунктов в разработке и серийном выпуске микросхем. Конструкторская документация состоит из карты заказа и программы методики измерения БИС.

В НПК «Технологический Центр» эксплуатируется несколько контрольно-измерительных стендов (КИС) Hewlett-Packard 83000 (HP-83000) и Hewlett-Packard 82000-D50 (HP 82000-D50). Входные данные для каждого КИС автоматически генерируются в САПР «Ковчег». Это папка, в которой шесть файлов для проверки микросхемы при различных условиях эксплуатации (в составе пластин в нормальных условиях по нормам ТУ, в диапазоне температур по нормам ТУ, нормальных условиях в цехе повышенной температуре в цехе, пониженной температуре в цехе). Каждый файл состоит из инструкций шаблона программ измерения.[3] В данный момент шаблоны инструкций программы контроля БИС с учётом специфики измерительного оборудования, вручную сверяются и обрабатываются инженерами, с учётом требований заказчика, ГОСТов и индивидуальных особенностей микросхемы. У ручной подготовки конструкторской документации имеется большое количество недостатков таких как: большое время на обработку результатов и подготовку документации, ошибки, человеческий фактор, неточности и опечатки.

Чтобы устранить упомянутые минусы, создаются программы, автоматически генерирующие документы методики измерения БИС. Использование таких систем экономит человеческие ресурсы, время, в том числе повышает точность и надёжность спецификации на микросхемы.

Сейчас большинство существующих отечественных решений сильно уступают по ряду параметров зарубежным аналогам. Кроме того, существующие программные решения в основном представляют собой отдельные утилиты разных производителей, выполняющие какой-либо небольшой этап длительного процесса производства микросхем. Стоит отметить, что использование ненадежных и дорогостоящих зарубежных систем может привести к встраиванию в электрическую схему аппаратных закладок и утечке разрабатываемых проектов [4].

На производстве в НПК «Технологический центр» используется САПР «Ковчег 4.07» с КИС-ми HP 83000 и HP 82000-D50, однако он не включает возможность формирования методики измерения БИС.[1]

По этой причине встал вопрос о разработке нового программного модуля, поддерживающего команды HP 83000 и HP 82000-D50.

Преимущества такого решения:

повышение скорости формирования документации;

возможность отследить отличия в результатах измерений при различных условиях;

автоматическое формирование документации;

уменьшение ошибок вследствие человеческого фактора.

С целью устранения вышеперечисленных недостатков на основании сравнения технических характеристик, представленных на рынке САПР из табл. 1, в НПК «Технологический центр» было принято решение разработать программный модуль (ПМ) автоматизации документооборота в составе отечественной САПР «Ковчег».

Таблица 1

Преимущества и недостатки существующих САПР

Название САПР / Критерий выбора	Synopsys [5]	Allegro PCB Designer [6]	Mentor Graphics PADS [7]	ПМ в составе САПР «Ковчег 4.08» [1]
Операционная система Microsoft Windows 7	+	+	+	+
Наличие унифицированной библиотеки функциональных ячеек для БМК серий 5503, 5507	-	-	-	+
Свободное распространение	-	-	-	+
Формирование документации для HP 82000-D50	-	-	-	+
Поддержка русского языка	-	+	-	+

Здесь + — данная функция поддерживается программой; - — данная функция отсутствует.

ПМ разработан для автоматической генерации документации с учётом особенностей контрольно-измерительных стендов, используемых на производстве, а также для снижения трудоемкости данной операции и уменьшения количества ошибок.

Эталонные значения, с которыми сравниваются данные, полученные с измерительных стендов, ПМ принимает из САПР «Ковчег». На выходе, при условии соблюдения всех норм и требований к микросхеме, получается файл документации с результатами измерений в соответствие с требованиями ЕСКД. В противном случае в специальное окно подпрограммы выводится информация обо всех ошибках, неточностях и некорректных значениях.

Для проверки файлов с тестами на соответствие реализуется алгоритм, схема которого представлена на рисунке.

ПМ получает на вход папку с проектом БИС из которой извлекает файлы с тестами для микросхем и другие параметры БИС, после чего файлы с тестами попарно сравниваются на соответствие друг другу и заявленной функциональности. Все несовпадения делятся на два типа: ошибки (критические неточности, при которых документ не формируется) и предупреждения (некритические неточности, при которых документ формируется, но на которые следует обратить внимание инженеру). В случае успеха генерируется документ, и в специальном окне отображается путь к нему в файловой системе. В противном случае в специальное окно выводятся все ошибки и предупреждения с указанием причин их возникновения.

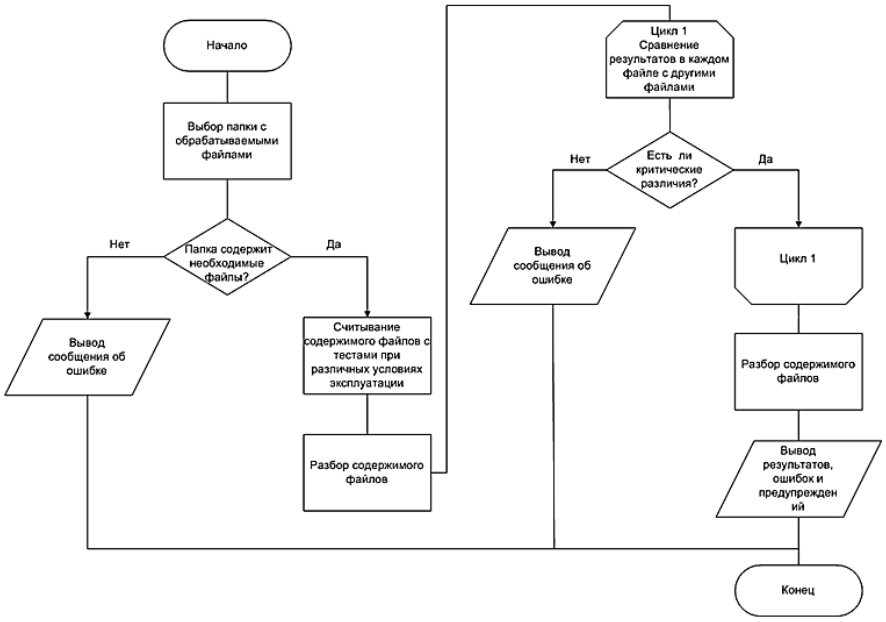


Схема алгоритма программного модуля

По рекомендациям сотрудников Научно-исследовательской лаборатории разработки САПР Отдела Интегральных Микросхем НПК «Технологический Центр», учитывая требования технического задания и САПР «Ковчег», был составлен список требований, предъявляемых к языку программирования, представленный в табл. 2.

Таблица 2

Анализ существующих языков программирования

Язык программирования / Критерии выбора	Java [8]	Python [9]	C++ [10]	C# [11]
Опыт разработки	+	-	+	+
Интегрируемость в САПР «Ковчег»	-	-	+	+
Возможность работы с исходными файлами проектов САПР «Ковчег»	-	-	+	+
Соответствие требованиям НПК «ТЦ»	-	-	+	+
Интегрируемость готовых проектов в ОС Windows 7/10	+	+	+	+
Возможность работы с Microsoft Word	-	-	-	+

Здесь + — данная функция поддерживается программой; - — данная функция отсутствует.

На основании результатов сравнительного анализа из табл. 2 языком программирования был выбран C#.

В результате проведенных работ по разработке программного модуля автоматизации документооборота в составе САПР «Ковчег» был реализован программный модуль, обеспечивающий уменьшение ошибок вследствие человеческого фактора, снижение трудоемкости, повышение скорости формирования документации. В настоящий момент ПМ внедряется в рабочий процесс НПК «Технологический Центр» как одна из подсистем отечественной САПР «Ковчег». Планируется, что использование ПМ позволит значительно сократить время от начала разработки БИС до выпуска ее в серийное производство.

Список литературы

1. Гаврилов С.В., Денисов А.Н., Коняхин В.В., Макарцева М.М. САПР «Ковчег 3.0» для проектирования микросхем на БМК серий 5503, 5507, 5521 и 5529. М.: Техносфера. 2013. 12 с.

2. Магеррамов Р.В. Процесс тестирования интегральных микросхем // Молодой ученый. 2015. №13. С. 154-158.

3. Магеррамов Р.В. Использование контрольно-диагностических стендов для тестирования микросхем // Молодой ученый. 2016. №17. С. 53-57.

4. Черников Б.В., Можжухина А.В., Борисова Е.А. Проблемы локализации ошибок при проектировании специализированных БИС // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 11-2. С. 301-305.

5. Сайт компании Synopsys [Электронный ресурс] URL: https://www.synopsys.com/ru-ru.html (дата обращения: 30.03.2020).

6. Описание Allegro PCB Designer [Электронный ресурс] URL: https://www.cadence.com/ en_US/ home/ tools /pcb- design- and- analysis/ pcb-layout / allegro-pcb-designer.html (дата обращения: 01.04.2020).

7. Страница загрузки Mentor Graphics PADS [Электронный ресурс] URL: https://www.pads.com/downloads/professional-eval-access (дата обращения: 31.03.2020).

8. О языке программирования Java [Электронный ресурс] URL: https://www.java.com/ru/about (дата обращения: 28.03.2020).

9. О языке программирования Python [Электронный ресурс] URL: https://www.python.org/about/ (дата обращения: 25.03.2020).

10. News, Status & Discussion about Standard C++ [Электронный ресурс] URL: https://isocpp.org/ (дата обращения: 02.04.2020).

11. Документация по C# [Электронный ресурс] URL: https:// docs. microsoft.com/ru-ru/dotnet/csharp/ (дата обращения: 03.03.2020).

Алёшина Валентина Ивановна, ведущий программист, aleshfam@list.ru, Россия, Москва, Научно-производственный комплекс «Технологический центр»,

Гаврилов Сергей Владимирович, начальник научно-исследовательской лаборатории, s.gavrilov@tcen.ru, Россия, Москва, Научно-производственный комплекс «Технологический центр»,

Болотин Юрий Сергеевич, студент, bolotin99@inbox.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Научно-производственный комплекс «Технологический центр»

SOFTWARE MODULE DEVELOPMENT FOR DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEM IN THE “KOVCHEG” CAD.

V.I. Aleshina, S.V. Gavrilov Y.S. Bolotin

The article analyzes the methods of electronic document management and identifies their shortcomings, selected tools, developed an algorithm scheme of software module. As a result of the study, a software module was developed to eliminate these shortcomings. It is planned that development will reduce the time from the start of design to the production of microcircuits.

Key words: microcircuit, electronic document management, LSI evaluation, «Kovcheg» CAD, LSI documentation.

Aleshina Valentina Ivanovna, senior software engineer, aleshfam@list.ru, Russia, Moscow, Scientific-Manufacturing Complex «Technology Center»,

Gavrilov Sergey Vladimirovich, head of scientific research laboratory, s.gavrilov@tcen.ru, Russia, Moscow, Scientific-Manufacturing Complex «Technology Center»,

Bolotin Yuri Sergeevich, student, bolotin99@inbox.ru, Russia, Moscow, National Research University of Electronic Technology, Scientific-Manufacturing Complex «Technology Center»

УДК 004.032.26

ВЫБОР СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В УГОЛЬНОМ ЗАБОЕ

Д.М. Шпрехер, Г.И. Бабокин, Е.Б. Колесников

Рассмотрена проблема возможности непрерывного прогнозирования концентрации метана в рабочем забое угольной шахты с целью повышения безопасности проведения работ в лаве и увеличения объема добываемого угля за счет сокращения времени простоя очистного комбайна по газовому фактору. Проводится анализ существующих аналитических и статистических методов и моделей для прогнозирования опасности ситуации с метаном, которые не нашли практического применения. Предлагается решить эту проблему с помощью цифровых технологий, основанных на использовании искусственного интеллекта, в частности нейронных сетей. Показано, что для прогнозирования уровня концентрации метана в забое необходимо измерить концентрацию метана не менее чем в трех точках отработанного воздуха, а также параметры режима работы комбайна и его расположения в лаве. Представлен результат прогнозирования уровня концентрации метана для выбранной структуры нейронной сети. Анализ полученных графиков свидетельствует о приемлемости результата, точность прогнозирования составляет 93%. Внедрение предлагаемой технологии для прогнозирования уровня концентрации метана в лаве рабочего участка шахты увеличит безопасность операций при проведении добычных работ, а также увеличит количество добываемого угля за счет сокращения времени простоя комбайна по газовому фактору.

Ключевые слова: *концентрация, метан, очистной комбайн, уголь, прогнозирование, нейронная сеть, среднеквадратичная ошибка прогнозирования.*

В настоящее время одной из важнейших проблем горной промышленности, является повышение производственной безопасности, особенно шахт категорийных по метану. Метановыделение при проведении горных

работ требует значительных затрат на проветривание выработок и дегазацию пластов, создает реальную угрозу возникновения пожаров и взрывов в зонах его скопления.

Образование опасной концентрации метана при работе очистного механизированного комплекса происходит в результате выделения метана из пласта, добываемого угля, транспортируемого угля, а также суфлярные выделения метана [1].

Выделение метана из пласта происходит постоянно и зависит от крепости, мощности и газообильности разрабатываемого пласта [2, 3, 4]. Выделение метана из угля, добываемого очистным комбайном в основном зависит от скорости его перемещения вдоль забоя. Объем метана, (сорбированного газа) выделяющегося из отбитого и транспортируемого угля скребковым конвейером лавы на порядок меньше объема метана выделяющегося при выемке угля комбайном и не оказывает существенного влияния на общую концентрацию метана в очистном забое. Суфлярные выделения метана изменяются случайно и трудно предсказуемы [5, 6, 7].

Основные методы обеспечения безопасной работы очистного забоя и исключения взрывов метана – это проведение дегазации пластов; совершенствование систем проветривания забоя; применение цифровых систем газового контроля концентрации метана в струе воздуха на вентиляционном штреке.

Применяемые системы контроля концентрации метана обеспечивают отключение системы электроснабжения очистного забоя и остановку его работы при превышении фактической концентрации метана заданного максимального значения и возобновление работы забоя через паузу после снижения концентрации метана ниже допустимой за счет проветривания забоя.

На практике, учитывая, что отбитый уголь главный источник газовыделения в очистном забое, применяют метод снижения скорости подачи комбайна, поддерживая концентрацию метана на уровне, меньшем, чем опасный. Это позволяет повысить безопасность работ в лаве угольной шахты, а также увеличить объем добываемого угля за счет сокращения простоев лавы.

Однако для поддержания безопасной по метану скорости подачи комбайна в таком режиме необходим точный прогноз концентрации метана на время, необходимое для принятия технологических решений.

В связи с изложенным для повышения безопасной по метану работы очистного забоя актуальна разработка системы текущего прогноза концентрации метана в струе воздуха вентиляционного штрека с применением интеллектуальных средств.

Постановка задачи исследования. В работах [4, 5] установлено, что на величину и интенсивность метановыделения в пределах выемочного участка существенно влияет местоположение, направление и скорость движения очистного комбайна вдоль линии очистного забоя. Экспериментальные наблюдения за метановыделением из обнаженной поверхности угольного пласта показывают существенные различия концентрации метана при неработающем комбайне и при его работе.

Поэтому, повысить эффективности работы газоопасных очистных забоев можно, наряду с обязательным применением средств вентиляции и дегазации, управляя газовыделением, путем регулирования скорости подачи угольного комбайна [6]. Это позволит повысить нагрузку на очистной забой и предотвратить простои из-за газового фактора следующим образом: при безопасной концентрации работа комбайна не останавливается, а его скорость максимально возможная; если концентрация переходит на уровень, приближающийся к опасной концентрации, то скорость движения комбайна уменьшается; если концентрация опасная – происходит отключение электроэнергии.

Опыт работы современных шахт показывают, что газовая ситуация при угледобыче изменяется от допустимой до предельной в течение нескольких минут. Поэтому возникает необходимость перехода от статического к динамическому принципу оценки газоопасности современных очистных забоев с учетом нестационарности добычи угля и выделения метана [7].

Оценить газоопасность очистного забоя возможно путем прогноза концентрации метана. Современные компьютерные системы аэро-газового контроля [8, 9], используемые на шахтах, не предусматривают возможность прогноза содержания метана в режиме онлайн. Это приводит к тому, что меры, направленные на предотвращение аварий или снижение их последствий, могут быть реализованы слишком поздно.

Прогноз концентрации метана должен осуществляется в реальном времени с использованием текущей исходной информации: концентрации метана в исходящих струях лавы и добычного участка, из выработанного пространства; количества проходящего воздуха; положения комбайна в лаве; нагрузки на очистной забой; данных сейсмоакустической активности пласта, дебита метана, извлекаемого дегазационными системами. Но данная задача сложная, так как необходимо учитывать множество факторов, оказывающих влияние на концентрацию метана на выходе из забоя [10].

Методы прогноза опасности ситуации по метану представляют собой предсказания его концентрации или оценки риска взрыва газа. Для этой цели используются различные способы и методы прогноза: статистические модели [11]; аналитические [12]; численные [13]; краткосрочные прогнозы [14]. Предпринимались также попытки описать газодинамику добычного забоя путем применения стохастической модели с использованием экспериментально определенных характеристик сигналов от датчиков, измеряющих параметры шахтного воздуха [15, 16]. Для ускоренного прогноза концентрации метана на выходе из лавы также применялись методы машинного обучения [17, 18].

Эти методы различаются с точки зрения их эффективности. В ряде случаев полученные результаты являются неудовлетворительными и существенно отличаются от реальных и на данный момент не нашли практического применения.

Цель работы - обоснование структуры и параметров искусственной нейронной сети (ИНС) для прогнозирования концентрации метана в исходящей струе очистного забоя при выемке угля комбайном в режиме онлайн с заданной точностью.

Метод и объект исследования. Объектом исследования является процесс изменения концентрации метана в исходящей струе очистного забоя при выемке угля комбайном в условиях шахты. Метод исследования – моделирование нейросетевого способа прогнозирования концентрации метана. Для решения поставленной задачи необходимо: определить тип и структуру ИНС для прогнозирования; обучить ИНС и выполнить численные исследования.

Основное содержание. Для прогноза концентрации метана использовались экспериментальные показатели, полученные от датчиков метана и скорости перемещения комбайна системы мониторинга параметров шахтной среды выемочного участка 26-28 ООО «Шахта «Есаульская», Кузбасс [19].

На рис. 1 приведен график, характеризующий газовую обстановку на исследуемом выемочном участке 26-28 при ритмичной работе очистного комбайна. Расположение датчиков для измерения параметров концентрации метана в внутризабойном пространстве представлено на рис. 2.

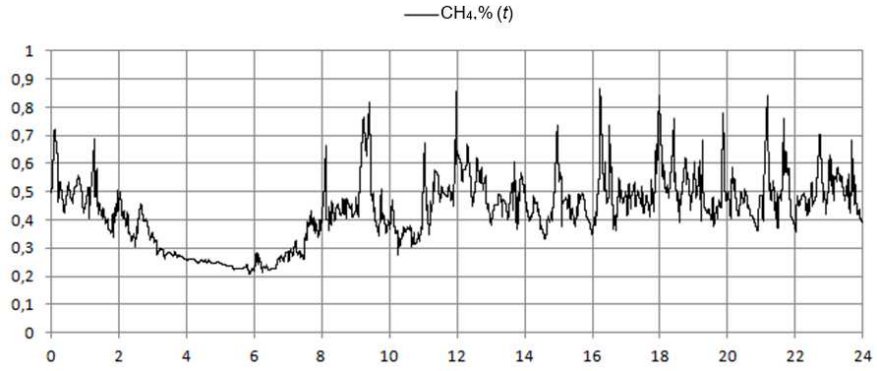
Задача прогнозирования уровня концентрации метана в зависимости скорости перемещения комбайна в работе решается с применением цифровых технологий на базе применения искусственного интеллекта, в частности искусственных нейронных сетей (ИНС) [20].

ИНС представляют собой универсальную аппроксимационную систему, позволяющую воспроизводить многомерные наборы данных и способную обучаться и адаптироваться к изменяющимся условиям внешней среды, а также обобщать полученные знания, формируя тем самым систему искусственного интеллекта [17, 21].

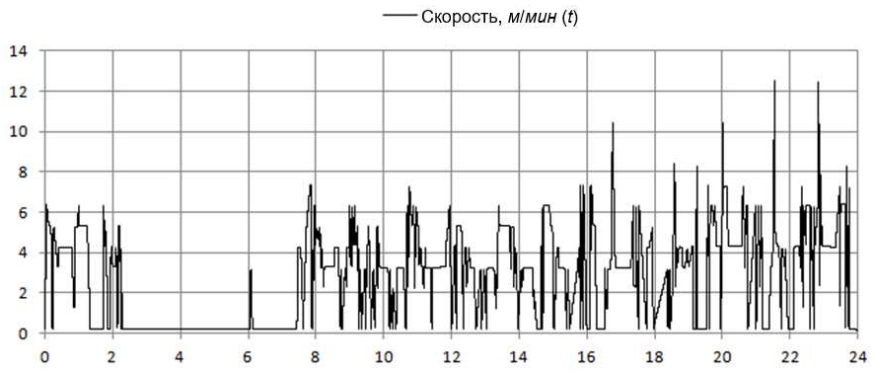
Для эксперимента, у нас есть набор данных временных рядов, содержащий 11522 значения, который дает информацию о режиме работы комбайна: его месторасположения, скорости и направления перемещения вдоль лавы, также значений показаний трех датчиков метана, расположенных: 1- в кутке, 2- на выходе лавы, 3 – на выходе участка (рис. 2).

Эксперимент выполнялся в среде MATLAB R2018b, установленной на операционной системе Windows 8, в частности в пакете расширения Neural Network Toolbox, содержащий средства для проектирования, моделирования, разработки и визуализации нейронных сетей [22].

Для анализа были выбраны четыре типа ИНС: нелинейная авторегрессионная сеть (Nonlinear Autoregressive Network, NARX -сеть); сеть Элмана - частный случай многослойной рекуррентной сети (Layer-Recurrent Network - LRN -сеть); сеть прямого распространения (Feed-Forward Network - FFN -сеть) и нейросеть с задержкой по времени (TDNN), которая является динамической (с временной задержкой) нерекуррентной многослойной сетью.



а



б

Рис. 1. Графики трендов содержания метана в исходящей струе очистного забоя (а) и динамики скорости движения комбайна (б) без учета проветривания

Для анализа были выбраны четыре типа ИНС: нелинейная авторегрессионная сеть (Nonlinear Autoregressive Network, NARX -сеть); сеть Элмана - частный случай многослойной рекуррентной сети (Layer-Recurrent Network - LRN -сеть); сеть прямого распространения (Feed-Forward Network - FFN -сеть) и нейросеть с задержкой по времени (TDNN), которая является динамической (с временной задержкой) нерекуррентной многослойной сетью.

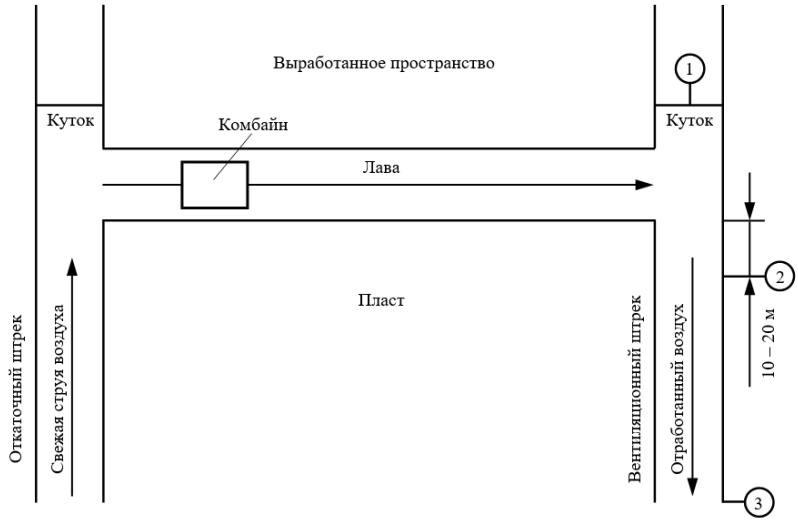


Рис. 2. Схема расстановки датчиков метана

Сеть Элмана имеет один внутренний слой, сигмоидальную функцию активации нейронов первого слоя, линейную функцию активации нейронов выходного слоя. Архитектура сети представлена на рис. 3, где D – временная задержка на один шаг. В MatLab обучение сети Элмана возможно только с помощью алгоритма градиентного спуска [23].

Далее приняты следующие обозначения на структурных схемах нейронных сетей: IW - матрица весов входа; LW - матрица весов нейронов промежуточного слоя; p - вектор входов; y - выход сети; TDL (Tapped Delay Line) – линии задержки. Линии задержки определим вектором $L=(l^{in},l^{out})$, где l^{in},l^{out} - длины входной и выходной линий соответственно [24].

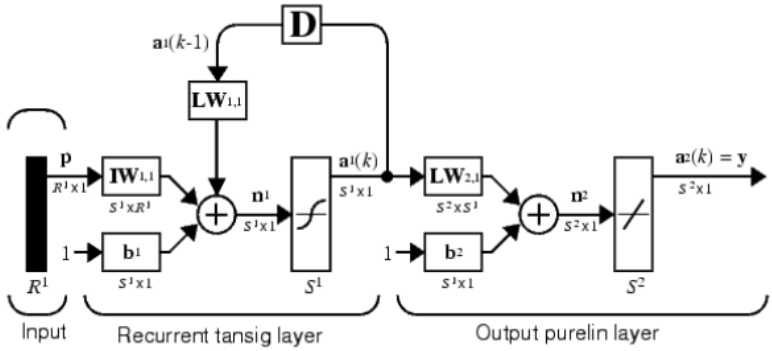


Рис. 3. Архитектура нейронной сети Элмана

Нелинейная авторегрессионная сеть (NARX –сеть) представляет собой модель нелинейной авторегрессии [25] с внешними входами, рис. 4.

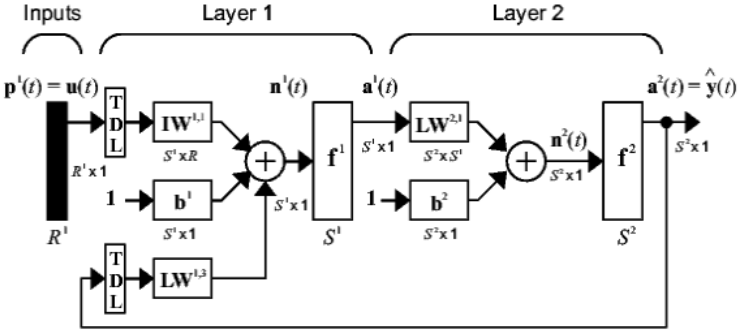


Рис. 4. Схема ИНС нелинейной авторегрессии с внешними входами (NARX)

Нейронная сеть прямого распространения (FFN -сеть) имеет архитектуру, представленную на рис. 5. [26].

Нейронная сеть прямого распространения с задержкой по входу (TDNN – сеть), представлена на рис. 6

Критерием выбора структуры модели сети было минимальная среднеквадратичная ошибка прогноза, что означает выбор таких значений параметров синаптических коэффициентов w_{ij}^1 и w_{ij}^2, которые обеспечивают минимум разности выхода по модели и желаемого выхода:

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k}[y_i - d_i]^2}{k}} \to \min$$

где k - количество тестовых реализаций, y_i - прогноз, полученных по модели (выход НС), d_i - желаемый прогноз.

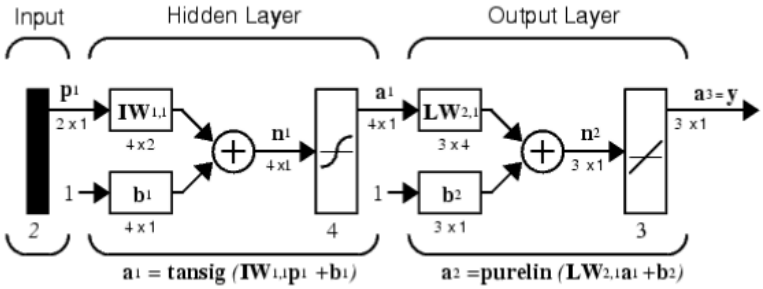


Рис. 5. Архитектура FFN- сети прямого распространения

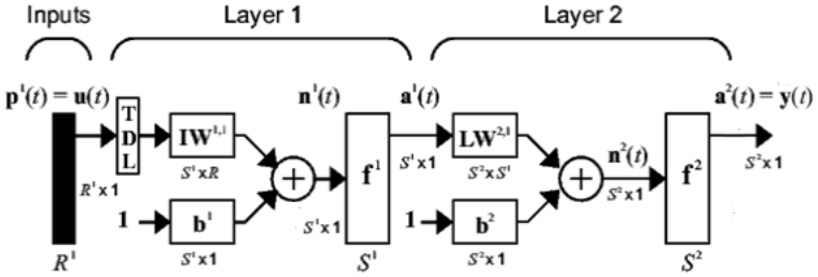


Рис. 6. Архитектура TDN сети прямого распространения с задержкой по входу

Предложена методология обоснования структуры и параметров ИНС прогнозирования уровня концентрации метана в зависимости от режима работы угольного комбайна с использованием методов ИНС, включающая следующие этапы: съем экспериментальных данных; сглаживание данных; разделение набора данных (сглаженные входные переменные) на обучающие данные, тестовые данные и данные проверки; проектирование вариантов сети; обучение сети и проверка качества прогнозирования; выбор лучшей сети, имеющей самую низкую ошибку прогнозирования.

После сглаживания наборы исходных данных были разделены на три подмножества: данные обучения (70% случаев), данные испытаний (15% случаев) и данные проверки (15% случаев) [27]. Подмножество обучающих данных используется для обучения сети, тогда как тестовый набор данных используется для проверки процесса обучения сети

Последний набор, а именно набор проверки, позволяет оценить качество сети и сравнить различные варианты сети, применяемые для конкретного анализа.

В таблице приведены сравнительные характеристики результатов прогнозирования для выбранных ИНС. Количество нейронов входного слоя соответствует количеству входных параметров. В качестве входных

параметров использовались следующие данные: 1- текущего времени работы комбайна в течение рабочей смены, 2- местоположения комбайна в лаве относительно номера секции, 3 - скорости перемещения комбайна, 4 - информации в какую сторону относительно лавы перемещается комбайн (в бинарном: «1» - перемещается условно «вперед», «-1» - перемещается условно «назад», «0»- стоит). В качестве выходных параметров для прогнозирования, использовались значения концентрации метана, снимаемые в трех точках, согласно расположения датчиков, как показано на рис. 3, а именно: в кутке $x1$, исходящий лава (на выходе лавы) $x2$, исходящий участок (на выходе рабочего участка) $x3$.

Результаты прогнозирования концентрации метана нейронными сетями

Сеть / Критерий	TDNN	LRN	NARX	FFN
Наличие обратной связи	нет	да	да	нет
Задержка во входном слое	да	нет	да	нет
Среднеквадратичная ошибка прогноза (*MSE*)	0,16	0,14	0,02	0,11

Из данных таблицы следует что сеть NARX обеспечивает наименьшую среднюю квадратичную ошибку прогноза, поэтому она была рекомендована для решения задачи прогнозирования. Точность прогноза у этой сети равна

$$\delta\,(\%) = (100 - MSE_{\%}) = (100 - 2) = 98\%$$

Модель нейронной сети типа NARX описывается следующими уравнениями:

$$y_j^{(1)}(n) = f^{(1)}[b_j^1 + \sum_{i=1}^{M^{(0)}} w_{ij}^{(1)} x(n-(i-1)) + \sum_{i=M^{(0)}+1}^{M^{(0)}+M^{(1)}} w_{ij}^{(1)} y^{(2)}(n-i)];$$

$$j \in \overline{1, N^{(1)}};$$

$$y^{(2)}(n) = f^{(2)}[b^{(2)} + \sum_{i=1}^{N^{(1)}} w_i^{(2)} y_i^{(1)}(n)],$$

где $N^{(k)}$ – количество нейронов в k -м слое, $M^{(k)}$ – задержка в k -м слое; $w_{ij}^{(1)}(n)$ – вес связи от нейрона в момент времени $n-(i-1)$ к j-му нейрону в первом слое в момент времени n, $w_i^{(2)}(n)$– вес связи от i -го нейрона к нейрону во втором слое в момент времени n; $y_j^{(1)}(n)$ –выход j-го нейрона в первом слое; $y^{(2)}(n)$– выход нейрона во втором слое; $f^{(k)}$– функция активация нейронов k-го слоя (гиперболический тангенс).

На рис.7, в качестве примера представлен график зависимости значений уровня концентрации метана снятого экспериментально и спрогнозированного (рассчитанного) нейронной сетью в точке измерения куток $x1$

за одну смену (24 ч). По горизонтальной оси отложено время в ч (за рабочую смену), по вертикальной оси значения в % уровня концентрации метана измеренные (*real*) и спрогнозированные НС (*forecast*).

Результат прогноза дает возможность диспетчеру шахты эффективно осуществлять мониторинг безопасности работы в очистном забое, что должно уменьшить число автоматических отключений электрической энергии по причине превышения допустимой концентрации метана и создать систему управления комбайна, обеспечивающую его работу по критерию минимизации времени принудительной остановки по газовому фактору.

Выводы.

1. Установлена необходимость прогнозирования концентрации метана в струе на выходе очистного забоя для повышения безопасности ведения горных работ и обеспечения регулирования скорости подачи и производительности очистного комбайна по объему метановыделения.

2. Разработана методология обоснования структуры и параметров ИНС прогнозирования концентрации метана в очистном забое, включающая: съем и сглаживание экспериментальных данных о концентрации метана в трех точках контроля и скорости и положения очистного комбайна в лаве; разделение их на обучающие, тестовые и проверочные; проектирование вариантов сети; обучение и прогнозирование с помощью ИНС концентрации метана для выбора лучшей сети по критерию минимальной ошибки прогнозирования.

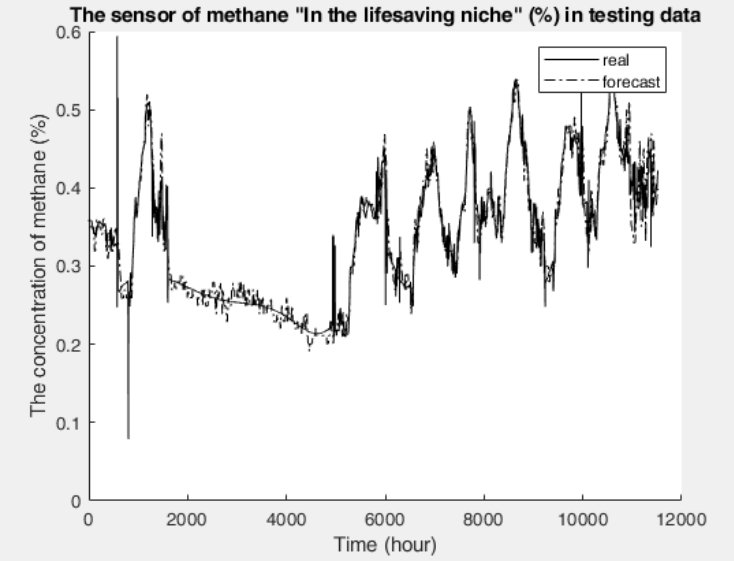


Рис. 7. Результат прогнозирования концентрации метана с датчика «куток»

3. В результате математического моделирования процесса прогнозирования концентрации метана в очистном забое 26-28 ООО «Шахта «Есаульская», ОАО «Кузбассуголь» установлено, что ИНС типа NARX, имеющая обратную связь и задержку во входном сигнале, обеспечивает прогноз ожидаемой концентрации метана в зависимости от режима работы очистного комбайна с достоверностью до 98 %.

Список литературы

1. Дацюк Н.М., Алтухов Е.И. Увеличение эффективности работы угледобывающих машин с помощью компьютерных систем контроля метановыделения // Материалы конференции «Энергетика. Экология. Человек». Киев: КПИ им. И. Сикорского, 2012. С. 279-286.

2. Шевченко Л.А., Зубарева В.А. Влияние технологического цикла в очистном забое на газообильность выемочного участка шахты // XII Международная научно-практическая конференция «Безопасность жизнедеятельности в промышленно развитых районах». Кемерово. 2017. С. 2011 – 2018.

3. Сапрыкина Т.В. Сравнительная оценка применения очистных комбайнов в метаноопасных лавах // Технические науки: теория и практика: материалы III Междунар. науч. конф. Чита: Издательство Молодой ученый, 2016. С. 105-108.

4. Болгожин Ш.А., Карабаев Г.И., Хакимжанов Т.Е. Анализ газовыделения в очистных забоях с переходом на узкозахватную выемку // Горное дело. Алма-Ата: МВиССО КазССР, 1968. Вып. 3. С. 34-37.

5. Калиев С.Г. Управление газовыделением на угольных шахтах. / С.Г. Калиев, Е.И. Преображенская, В.А. Садчиков и др. М: Недра, 1980. 221 с.

6. Абдугалиева Г.Ю. Оценка влияния скорости движения угольного комбайна на интенсивность газовыделения в лаву // Труды Международной научно-практической конференции «Стратегия развития горно-металлургического комплекса Казахстана», посвященной 100-летия со дня рождения И.А. Онаева. Алма-Ата: КазНТУ, 2013. С. 19 – 24.

7. Колмаков В.А., Чередниченко М.В. Метод оценки интенсивности добычи угля комбайнами в метаноопасных очистных выработках // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2010. №6. С. 20-22.

8. Брюханов А.М., Иванов Ю.А., Силаков С.М. Создание современной системы комплексной безопасности: сб. науч. тр. МакНИИ // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. Макеевка-Донбасс, 2007. Вып. 20. С. 7-15.

9. Радченко В.В., Малеев Н.В., Мартынов А.А., Захаров В.С., Шевцов В.А. Перспективы повышения уровня промышленной безопасности угольных шахт при использовании системы диспетческого контроля (УТАС) // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2005. № 2(12). С. 32-44.

10. Bojko B. The Analysis of Acquired Measurements of Methane Concentration in Mine Galleries – Selected Examples, Proceedings of 3rd School of Mine Ventilation, Zakopane, 2004.

11. Dixon W.D. A statistical analysis of monitored data for methane prediction, PhD Thesis, University of Nottingham, Dept. of Mining Engineering, 1992.

12. Krause E., Krzystolik P., Lukowicz K. Recognition, Forecasting, Control and Combating Methane Hazard in Hard Coal Mines; GIG: Katowice, Poland, 2001.

13. Brodny J., Tutak M., John A. Analysis of Influence of Types of Rocks Forming the Goaf with Caving on the Physical Parameters of Air Stream Flowing Through These Gob and Adjacent Headings. Mechanics 2018, 24. P. 43–49.

14. Badura H. Short-Term Prediction Methods for Methane Concentrations at the Outlets from Caving Longwall Areas at Coal Mines. Politechnika S´la˛ska: Gliwice, Poland, 2013.

15. Firganek B. Stochastic Model of Methane Emission in Longwall Faces // Proceedings of 29th International Conference of Safety in Mines Research Institutes. Szczyrk, Poland, 2001. Vol. 1.

16. Novoselov S., Popov V., Filatov Yur., Hee Lee, Golik A. Problem of methane-air mixture explosions in working faces of coal mines at mining intensification and ways of its solution // The Second International Innovative Mining Symposium. E3S Web of Conf erences 21, 01034 (2017). P. 1-5. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172101034.

17. Tutak M., Brodny J. Predicting Methane Concentration in Longwall Regions Using Artificial Neural Networks // International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019. 16(8). P.2-21. https://doi.org/ 10.3390 /ijerph16081406.

18. Borowski M., Szlązak N. Predicting the release of methane into the longwall workings in Polish coal mines using neural networks // International Mining Conference 2014 «Theory and Technique of Coal Mining and Disaster Prevention in Deep Mines», 2014. P. 1-7. https://www.researchgate.net/ publication/272480802.

19. Поздеев И.А. Обоснование параметров, взаимодействующих геомеханических и газофильтрационных процессов в углепородном массиве в окрестности движущегося очистного забоя: дис. канд. техн. наук. Новокузнецк, 2018. 194 с.

20. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс 2-е изд. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.

21. Дікова Ю.Л. Розробка нейромережевого способу прогнозу вмісту метану в гірничих виробках // Технологический аудит и резервы производства, 2015. № 5/6(25). С. 60-62.

22. Саяпина И.А. Нейросетевое моделирование аппаратуры рельсовых цепей // Инфрмационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте, 2014. № 1 (104). С. 83-87.

23. Карпенко А.П., Косоруков К.Н., Сабуров А.А., Чернецов С.А. Нейросетевое прогнозирование уровня глюкозы в крови больных сахарным диабетом I типа // Наука и образование. Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. № 7. С. 1-31.

24. Бодянский Е.В., Руденко О.Г. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применение. Харьков: Телетех, 2004. 304 с.

25. Кретов Д.А., Рузанов Р.В. Прогнозирование электропотребления энергосбытовой компании с использованием искусственной нейронной сети // Инженерный вестник Дона, 2015. №2. С. 20.

26. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории. М.: Горячая Линия - Телеком, 2010. 56 с.

27. Дерябин В.В. Алгоритмы обучения нейросетевой системы счисления пути судна // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 2016. 3(37). С. 23-33.

Шпрехер Дмитрий Маркович, д-р техн. наук, доцент, shpreher-d@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский Государственный Университет,

Бабокин Геннадий Иванович, д-р техн. наук, профессор, babokinginov@yandex.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Горный институт,

Колесников Евгений Борисович, канд. техн. наук, доцент, kolesnikov55@mail.ru, Россия, Новомосковск, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Новомосковский институт (филиал)

SELECTION OF THE STRUCTURE AND PARAMETERS OF A NEURAL NETWORK FOR FORECASTING METHANE CONCENTRATION IN COAL FACE

D.M. Shprekher, G.I. Babokin, E.B. Kolesnikov

The problem of the possibility of continuous forecasting the concentration of methane in the working face of a coal mine with the aim of increasing the safety of working in the lava and increasing the volume of coal produced by reducing the idle time of the shearer by the gas factor is considered. An analysis is made of existing analytical and statistical methods and models to predict the dangers of the situation with methane, which have not found practical application. It is proposed to solve this problem using digital technologies based on the use of artificial intelligence, in particular neural networks. It is shown that in order to predict the level of methane concentration in the face, it is necessary to measure the methane concentration in at least three points of the exhaust air, as well as the parameters of the operation mode of the combine and its location in the lava. The result of predicting the level of methane concentration for the selected structure of the neural network is presented. The analysis of the obtained graphs indicates the acceptability of the result, the forecasting accuracy is 93%. The introduction of the proposed technology to predict the level of methane concentration in the lava of the mine working section will increase the safety of operations during mining operations, as well as increase the amount of coal mined by reducing the downtime of the combine by the gas factor.

Key words: concentration, methane, shearer, coal, forecasting, neural network, mean square error of forecasting.

Shprekher Dmitry Markovich, doctor of technical science, docent, shpreher-d@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Babokin Gennady Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, babokinginov@yandex.ru, Russia, Moscow, National research technological University "MISIS", Mining Institute,

Kolesnikov Evgeny Borisovich, candidate of technical science, docent, kolesnikov55@mail.ru, Russia, Novomoskovsk, Novomoskovsk branch (institute) of D. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia

УДК 53.043

СИЛОВОЕ ПОЛЕ ПРИ ВЗРЫВЕ В ВОДЕ ЗАРЯДОВ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Г.Т. Володин, Д.С. Кочергин

Рассматривается задача о силовом поле, возникающем при взрыве в безграничной жидкости (в воде) заряда конденсированного взрывчатого вещества (ВВ). Показано, что величины импульсных нагрузок в точках этого поля существенно зависят от характеристик заряда ВВ, его формы, удаления элемента конструкции от очага взрыва. Предлагаемый метод расчёта параметров на фронте ударной волны использует экспериментальные данные.

Ключевые слова: импульс, взрыв заряда, силовое поле эксперимент, вода, центр взрыва, конденсированное взрывчатое вещество.

На относительно больших расстояниях от центра взрыва давление скоростного напора в воде можно не учитывать, так как оно мало по сравнению с давлением в волне. Поэтому взрывную нагрузку при взрыве в воде принято характеризовать только давлением на фронте, законом убывания давления с течением времени и удельным импульсом фазы сжатия [1].

Для случая безграничной жидкости (воды) изменение давления с течением времени в фиксированной точке пространства принято [2] определять формулой:

$$\frac{p-p_1}{p_1}=\frac{p_2-p_1}{p_1}\cdot e^{-\frac{t}{\vartheta}}, \qquad (1)$$

где $p_{01}=p_0+\rho gh$; p_0 - давление на поверхности жидкости; ρ - плотность жидкости; h – глубина погружения заряда; g – ускорение силы тяжести; t – время, отсчитываемое от момента прихода фронта ударной волны в данную точку; ϑ – постоянная времени, которая определяется по формулам [1]:

1) для сферического заряда

$$\frac{a_{01}\vartheta}{r_0}=1,4\left(\frac{r}{r_0}\right)^{0,24}; \qquad (2)$$

2) для удлиненного цилиндрического заряда

$$\frac{a_{01}\vartheta}{r_0}=1,8\left(\frac{r}{r_0}\right)^{0,43}, \qquad (3)$$

где r_0 - радиус заряда ВВ; a_{01} - скорость звука в невозмущенной жидкости (в воде).

В соответствии с соотношениями (1) удельный импульс фазы сжатия выразим соотношениям

$$i=\int_0^{\tau_+}(p-p_1)dt=(p_2-p_1)\int_0^{\tau_+}e^{-\frac{t}{\vartheta}}dt=-(p_2-p_1)\vartheta e^{-\frac{t}{\vartheta}}\Big|_0^{\tau_+},$$

или

$$i = (p_2 - p_1)\vartheta(1 - e^{\frac{-\tau_+}{\vartheta}}). \quad (4)$$

В безграничной среде $\frac{\tau_+}{\vartheta} > 5$, поэтому [1]

$$i = (p_2 - p_1)\vartheta. \quad (5)$$

В работе [3] зависимость давления от времени предлагается аппроксимировать более сложной зависимостью:

$$\frac{(p - p_1)}{(p_2 - p_1)} = \begin{cases} e^{-\frac{t}{\vartheta}} \text{ при } 0 < \frac{t}{\vartheta} < 1 \\ 0{,}368\frac{\vartheta}{t} \text{ при } 1 \le \frac{t}{\vartheta} < 10, \end{cases} \quad (6)$$

при этом для сосредоточенных зарядов и $30 < \frac{r}{r_0} < 240$

$$\frac{a_{01}\vartheta}{r_0} = 3{,}5\sqrt{\ln\frac{r}{r_0} - 0{,}9}. \quad (7)$$

В соответствии с формулой (6) удельный импульс фазы сжатия выразим в виде

$$\frac{i}{(p_2 - p_1)\vartheta} = \begin{cases} 1 - e^{-\frac{\tau_+}{\vartheta}}, \text{если } t_+ < \vartheta \\ 0{,}632 + 0{,}368\ln\frac{\tau_+}{\vartheta}, \text{ если } \vartheta \le \tau_+ < 10\vartheta \end{cases}. \quad (8)$$

Для установления зависимостей между параметрами на фронте ударной волны необходимо привлечь интегральные законы сохранения массы, импульса и энергии, которые приводят к уравнениям

$$\left.\begin{aligned} &1.u_2 = \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right)D \\ &2.\ p_2 - p_1 = \rho_1 u_2 D \\ &3.Q_1 = E_2 - E_1 + \frac{p_2 + p_1}{2}\left(\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_1}\right) \end{aligned}\right\}, \quad (9)$$

где ρ, u, p, E – соответственно плотность, скорость частиц, давление, внутренняя энергия единицы массы среды; при этом индексы 2,1 относятся соответственно к параметрам среды на фронте ударной волны и к параметрам среды в невозмущенном состоянии; $D = \frac{dr_2}{dt}$ - скорость фронта ударной волны; r_2 - координата фронта; t – время; Q_1 - удельная энергия, поглощаемая на фронте ударной волны. Уравнение состояния воды представим в калорической форме

$$E = \frac{p}{(\text{щ}-1)\rho}, \tag{10}$$

где

$$\text{щ} = \text{щ}_1 + (\text{щ}_2 - \text{щ}_1)\frac{\rho - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1}, \tag{11}$$

$\text{щ} = \frac{C_\rho}{C_v}$ - отношение удельных теплоемкостей, изобарной к изохорной.

Преобразуем систему уравнений (9) к безразмерному виду. Введём безразмерный параметр q:

$$q = \frac{a_{01}}{D}, \tag{12}$$

а также

$$\eta = \frac{\rho_2}{\rho_1}. \tag{13}$$

Тогда соотношения (9) на фронте ударной волны примут вид:

$$\left.\begin{aligned} &1.\ \frac{u_2}{a_{01}} = \left(1 - \frac{1}{\eta}\right)\frac{1}{q} \\ &2.\ \frac{p_2}{p_1} = \frac{\rho_1 a_1^2}{p_1}\left(1 - \frac{1}{\eta}\right)\frac{1}{q^2} + 1 \\ &3.\ \text{ù}_2 = 1 + \frac{1 + \left(1 - \frac{1}{\eta}\right)\frac{a_{01}^2\rho_0}{p_1 q^2}}{\left(\frac{\rho_0 Q_0}{p_1} + \frac{1}{\text{ù}_1 - 1}\right)\eta - \left[1 + \frac{a_{01}^2\rho_0}{2p_1}\left(1 - \frac{1}{\eta}\right)\frac{1}{q^2}\right](1-\eta)} \end{aligned}\right\}. \tag{14}$$

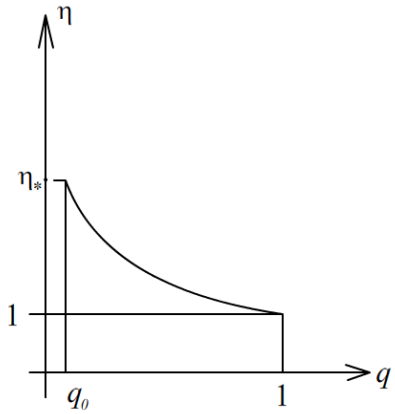
Ударная волна в воде при удалении от центра взрыва вырождается в звуковую ($q \to 1$), при этом плотность возмущенной среды на фронте волны стремится к плотности невозмущенной среды ($\rho_2 \to \rho_1$), следовательно $\eta \to 1$. При этом характер функций $\eta = \eta(q)$ имеет вид (рисунок).

Принимая из экспериментов значения $\eta_* = \eta(q_0)$ и $\gamma = \frac{d\eta}{dq}|_{q=0}$, а также учитывая соотношение $\eta(1) = 1$, функцию $\eta = \eta(q)$ представим в виде

$$\eta(q) = 1 - \frac{A}{\beta + 1}(1-q)^{\beta+1}, \tag{15}$$

где

$$\left.\begin{aligned} A &= \frac{\gamma}{(1-q_0)^{\beta}} \\ \beta &= \frac{\gamma(1-q_0)}{1-\eta_*} - 1 \end{aligned}\right\}. \qquad (16)$$



Принципиальный график зависимости относительной плотности от интенсивности ударной волны

Величины q_0, η_*, γ определяются из экспериментальных данных, причем $q_0 = \frac{a_1}{D_0}$ соответствует взрыву заряда ВВ соответствующего вида, формы и размеров.

Таким образом, зная закон движения фронта ударной волны, то есть зависимость $r_2 = r_2(t)$ (или в безразмерных переменных зависимость $R = R(q)$) по найденным соотношениям определяется удельный импульс, созданный ударной волной в фиксированной точке возмущенной области.

Полученные результаты могут быть использованы в расчётах на прочность элементов конструкций, подверженных воздействию взрывных нагрузок в воде.

Список литературы

1. Саламахин Т.М. Физические основы механического действия взрыва и методы определения взрывных нагрузок. М.: ВИА, 1974. 255 с.

2. Коул Р.Г. Подводные взрывы. М.: ИИЛ, 1950. 494 с.

3. Замышляев Б.В., Яковлев Ю.С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. Л.: Судостроение, 1967. 387 с.

Володин Геннадий Тимофеевич, д-р техн. наук, профессор, g.volodin@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Кочергин Денис Сергеевич, аспирант, sir.cod4@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

POWER FIELD IN EXPLOSION IN WATER OF CHARGES OF CONDENSED EXPLOSIVES

G.T. Volodin, D.S. Kochergin

The problem of a force field arising from an explosion in a limitless liquid (in water) of a charge of a condensed explosive (BB) is considered. It is shown that the magnitude of the impulse loads at the points of this field substantially depends on the characteristics of the explosive charge, its shape, and the removal of the structural element from the explosion center. The proposed method for calculating the parameters at the shock front uses experimental data.

Key words: impulse, charge explosion, force field experiment, water, center of explosion, condensed explosive.

Volodin Gennady Timofeyevich, doctor of technical sciences, professor, g.volodin@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kochergin Denis Sergeyevich, postgraduate, sir.cod4@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 654.026

К ВОПРОСУ ОБ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕГРАДАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ

М.Н. Плут, С.П. Кривцов, О.А. Губская, О.П. Ануфриева, О.Р. Спиридонов, Е.В. Фатьянова

Показано, что прокладка оптического кабеля на высоковольтных линиях электропередач, на опорах железных дорог или рядом с ними приводит к выходу его из строя. Как показали исследования, основной причиной нарушения связи является электротермическая деградация оптического кабеля. В данной статье подробно рассмотрены причины возникновения электротермической деградация оптического кабеля и их негативное воздействие на его параметры.

Ключевые слова: оптический кабель, волоконно-оптические линии связи, поверхностное сопротивление, электротермическая деградация, электромагнитное поле, контактная сеть, сопротивление заземления, конденсатор, удельное сопротивление поверхности оболочки оптического кабеля, напряжение, микродуги и микроразряды, напряжение коронирования, арамидные нити.

Под электротермической деградацией (ЭТД) будем понимать разрушение оболочки оптического кабеля (ОК) из-за протекания токов по загрязнённой поверхности его оболочки. ЭТД проявляется в следующих случаях: ОК подвешен на высоковольтных линиях электропередачи; на опорах железных дорог или рядом с ними, при климатических воздействиях (перепады температуры, влажность) и др.

Основными факторами, вызывающими электротермическую деградацию, являются:

емкостные токи утечки, возникающие на загрязненной поверхности ОК под действием переменных электромагнитных полей (ЭМП),, создаваемых контактной сетью и другими высоковольтными проводами, подвешенными на опорах контактной сети;

токи утечки контактной сети, питающих и усиливающих проводов переменного тока, связанные с повышенным сопротивлением заземлений и с загрязнением изоляторов;

воздействие ЭМП, вызывающее поляризационные процессы в диэлектрических элементах ОК, сопровождающиеся выделением тепла [1].

Ток утечки возрастает из-за уменьшения удельного сопротивления поверхности оболочки. Удельное сопротивление поверхности оболочки уменьшается при увлажнении и последующем высыхании загрязненных участков оболочки. Работоспособность ОК сохраняется до тех пор, пока это сопротивление не достигнет критического значения, при котором становится возможным образование дугового разряда. Минимально допустимая величина удельного сопротивления обратно пропорциональна величине наводимого на оболочке напряжения, которое в зависимости от размещения кабеля на опоре может достигать 20 кВ. Удельное сопротивление уменьшается по мере старения оболочки кабеля под воздействием климатических факторов, загрязнений, интенсивность которых обусловлена местом расположения, типом перевозимых грузов, близостью пожаров. Следовательно, удельное сопротивление зависит от состояния поверхности кабеля, а значит, от срока его эксплуатации.

Процессы электротермической деградации под действием токов утечки развиваются следующим образом: загрязнённая и увлажненная поверхность ОК постепенно высыхает под влиянием ветра, солнца и нагрева токами утечки, на сухих участках (равных диаметру ОК) возникают первые дуговые разряды. При длительном нахождении ОК в эксплуатации поверхностное сопротивление снижается, рассеиваемая мощность растёт, когда рассеиваемая мощность достигает некоторого критического значения, появляются микродуги и микроразряды, приводящие к пережогу ОК. При снижении поверхностного сопротивления до 2 кОм/см, рассеиваемая мощность достигает максимального значения. Чем меньше становится удельное сопротивление, тем больше токи утечки на землю.

Коронные, поверхностные частичные и скользящие разряды отрицательно влияют на надёжность работы ОК, так как в результате их влияния появляется электрическое поле большой напряжённости. На переходе от сухого ОК к зажиму напряжение коронирования достаточно мало, его повышение приводит к возникновению микродуг, ОК резко деградирует - появляются треки (прожженные каналы), загорается оболочка. Длительный процесс коронирования на переходе от ОК к зажиму сопровождается образованием озона и окислов азота, являющихся агрессивными окислителями. При определённых значениях мощности коронирующий процесс может переходить в дуговой разряд, что приводит к термическому разрушению ОК.

Деградация в виде вздутий оболочки возникает под действием тепла от горения камыша или травы вблизи трассы подвески ОК либо под воздействием внешнего электромагнитного поля. Направление вздутия совпадает с направлением, вдоль которого напряжённость поля изменяется с большей скоростью.

Температурные воздействия - это процессы изменения температуры среды, в которой находится ОК. Под средой подразумеваются: воздух, вода, почва.

Наиболее яркие последствия таких влияний характерны для подвесных кабелей, так как в воздухе перепад температур обычно гораздо больше, чем в почве или воде.

Положительные и отрицательные температуры вызывают соответственно расширение и сжатие оптического волокна и других составляющих ОК, что, в свою очередь, приводит к возникновению механических напряжений в нем. Такого рода напряжения приводят к росту трещин в волокне, а это провоцирует увеличение коэффициента затухания. Вопросы, связанные с влиянием температур наиболее актуальны именно для РФ, так как территория страны охватывает практически все климатические пояса и природные зоны.

Воздействия положительных и отрицательных температур одинаково опасны. Так при нахождении оптического кабеля в условиях повышенных температур происходит размягчение оболочек, у арамидных нитей наблюдается снижение разрывной прочности.

Всё это приводит к увеличению нагрузки непосредственно на оптическое волокно, то есть его сдавливанию, а значит, влечёт за собой рост коэффициента затухания.

Влияние низких температур так же приводит к разрушению составляющих ОК, провоцирует трещины, а значит увеличиваются потери мощности.

Так же стоит отметить, что совместное воздействие различных температур приводит к изменению значения потерь (чаще к увеличению) в оптическом волокне.

Негативные последствия от воздействия температур обусловлены разными значениями коэффициентов сжатия и расширения материалов ОК кабеля и волокна.

Вода наносит вред оптическому волокну и является одним из основных факторов, влияющих на разрушение волокна. При скапливании в кабеле она может вызвать долгосрочное снижение механической прочности волокна. Это особенно касается кабелей с плотной упаковкой волокон, в которых волокно в течение всего срока службы испытывает то удлинение, то сжатие.

Рассмотрим детально влияние воды на параметры ОК:

попавшая в кабель вода под воздействием отрицательных температур превращается в лед, в результате чего во всех составляющих кабеля, куда попала вода, появляются трещины, происходит сдавливание оптического волокна, что приводит к повреждению кабеля и волокна, а, следовательно, к увеличению коэффициента затухания.

атомы водорода, которые содержатся в молекулах воды, через некоторое время (как правило, от 5 до 12 лет) могут проникнуть в волокно, которое очень чувствительно к водороду, и вызвать его «замутнение», т.е. повышенное затухание и последующее нарушение связи. Водород, выделяющийся с течением времени, при разложении воды, является очень активным элементом и, вступая в реакцию с кислородом, составляющим структуру кварца, вызывает поглощение, известное как поглощение ОН- с центром на длине волны 1385 нм. Со временем этот пик захватывает и те длины волн в третьем окне прозрачности, на которых идет передача информации, что приводит к замутнению оптического волокна. Вода проникает в кабель через негерметичную внешнюю оболочку, а также, со временем, диффундирует через оболочки.

Электротермическая деградация оптического кабеля проявляется так же в разрушении поддерживающих зажимов и конструктивных элементов в месте наложения зажимов, в появлении вздутий оболочки в пролётах между опорами.

Причины электротермической деградации в зажимах установлены следующие:

неоднородность состава и электрического сопротивления вставки;

недостаточный температурный предел хрупкости и морозостойкости;

высокий коэффициент озонного старения;

низкая стойкость к вибрациям;

недостаточная способность к сезонным перемещениям кабеля в зажиме [2].

Резиновая вставка под воздействием низких температур (минус 15С) затвердевает и перестаёт выполнять свои функции, что приводит к попаданию влаги в кабель, а значит к развитию электротермической деградации.

Вывод: рассмотренные причины возникновения электротермической деградации оптического кабеля позволяют при его прокладке качественно оценить их негативное воздействие на его параметры за счет выбора трассы волоконно-оптической линии связи с учетом максимальной удаленности ее от высоковольтных линий электропередач и контактных электрических сетей железных дорог.

Список литературы

1. Осипов В.А., Соловьев Г.Е., Гороховский Е.В., Капкаев А.А. Проблемы электротермической деградации волоконно-оптических линий связи и перспективное направление их решения // Инженерный вестник Дона, 2013. [Электронный ресурс] URL: http://www.ivdon.ru/ ru/ magazine/ archive/n1y2013/1539 (дата обращения: 10.02.2020).

2. Бочев А.С., Осипов В.А. и др. Электродинамическая деградация оптического кабеля на участке железных дорог с электротягой переменного тока. Журнал: LIGHTWAVE. 2006. №3. С. 20-24.

Плут Михаил Николаевич, канд. техн. наук, доцент, mplout@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Кривцов Станислав Петрович, старший преподаватель, Staskriv@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Губская Оксана Александровна, адъюнкт, Staskriv@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Ануфриева Ольга Павловна, курсант, olyaolya970103@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Спиридонов Олег Романович, студент, Staskriv@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича,

Фатьянова Елена Валентиновна, преподаватель, fatlen77@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного

ON THE ISSUE OF ELECTROTHERMAL DEGRADATION OF OPTICAL CABLE.

M.N. Plut, S.P. Krivtsov, O.A Gubskaya, O.P. Anufrieva, O.R. Spiridonov

It is shown that the laying of an optical cable on high-voltage power lines, on railway poles or near them leads to its failure. Studies have shown that the main cause of communication failure is electrothermal degradation of the optical cable. This article describes in detail the causes of electrothermal degradation of optical cable and their negative impact on its parameters.

Key words: optical cable, fiber-optic communication lines, surface resistance, electrothermal degradation, electromagnetic field, contact network, ground resistance, capacitor, resistivity of the optical cable shell surface, voltage, micro-arcs and micro-discharges, corona voltage, aramid filaments.

Plut Mikhail Nikolaevich, candidate of technical science, docent, mplout@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of telecommunications named after Marshal Of The Soviet Union S. M. Budyonny,

Krivtsov Stanislav Petrovich, senior lecturer, Staskriv@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of telecommunications named after Marshal Of The Soviet Union S.M. Budyonny,

Gubskaya Oksana Alexanrovna, postgraduate, Staskriv@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of communications named after Marshal Of The Soviet Union S.M. Budyonny,

Anufrieva Olga Pavlovna, cadet, olyaolya970103@yandex.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of telecommunications named after Marshal Of The Soviet Union S.M. Budyonny,

Spiridonov Oleg Romanovich, student, Staskriv@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of telecommunications named after Professor M.A. Bonch-Bruevich,

Fatyanova Elena Valentinovna, teacher, fatlen77@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny

УДК 621.317.39

МОДЕЛЬ РАБОТЫ И ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

О.Н. Акиншин, И.Ю. Мацур, Д.В. Ёркин

Разработана модель структурной схемы радиочастотной идентификации (РЧИ) объектов контроля. Представлена функциональная диаграмма последовательности информационного обмена для систем связи базовой логистической модели. Определены параметры канала передачи от устройства считывания к радиочастотной метке и обратно.

Ключевые слова: радиочастотная метка, модель, структурная схема, идентификация, передача данных, устройство считывания, радиоинтерфейс, алгоритм.

Системы радиочастотной идентификации (РЧИ) в настоящее время используются для идентификации разнообразных охраняемых и контролируемых объектов как военного так и гражданского назначения [1].

На рис. 1 показана упрощенная модель структурной схемы системы РЧИ. Система РЧИ состоит из двух основных частей: радиочастотная метка и устройство считывания/опроса. Объединение этих двух частей осуществляется по радиоинтерфейсу.

Процессы применения - блок, выполняющий комплекс функций «мобильного» применения, из которых общая распределенная модель может являться лишь одним из процессов применения.

Управление передачей данных (УПД) со стороны радиочастотной метки - блок, который работает с независимой от среды частью канала передачи данных.

Согласование со средой передачи данных (ССПД) - блок, являющийся объектом, зависящим от среды.

Управление передачей данных (УПД) со стороны устройства считывания / опроса - блок, который работает с независимой от среды частью канала передачи данных.

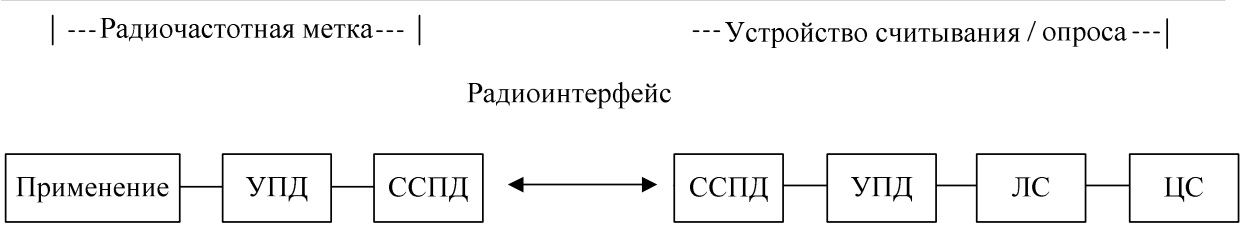


Рис. 1. Модель структурной схемы системы РЧИ

Локальная система (ЛС) - блок, являющийся совокупностью локальных объектов, реализующий исполнительные функции применения системы общей распределенной модели и работающий в режиме «реального времени».

Центральная система (ЦС) - блок, выполняющий все централизованные функции «стационарного» применения системы общей распределенной модели.

На рис. 2 показана структура взаимодействия и содержание операций в точке «Радиоинтерфейс» (типичная операция с радиочастотной меткой).

Процесс взаимодействия в точке «Радиоинтерфейс» начинается с момента начальной загрузки главным устройством считывания/опроса подчинённому устройству – радиометке сообщения в соответствии с заранее установленными условиями взаимодействия по согласованному между ними алгоритму: протокол, кодирование, применение. Подчинённое устройство (радиометка) может начать взаимодействие с главным устройством, если оно работает по тому же алгоритму.

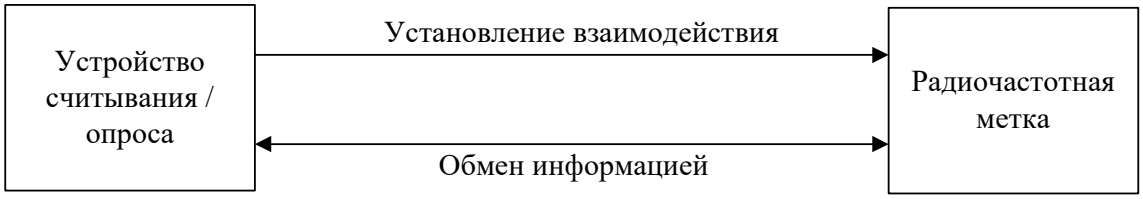


Рис. 2. Типичная операция с РЧИ

Функциональная диаграмма последовательности операций взаимодействия (последовательности информационного обмена) для систем связи базовой логистической модели общего распределении представлена на рис. 3.

Радиоинтерфейс является общим элементом всех систем радиочастотной идентификации (рис. 1). В связи с тем, что взаимодействие узлов системы РЧИ, осуществляемое по радиоинтерфейсу, требует определенных временных затрат, а также, в связи с тем, что границы зоны опроса определяются конструкцией антенны и мощностью излучаемых сигналов, для систем РЧИ требуется специальная структура протокола. Для этой цели используется укороченная (усеченная) модель, состоящая из прикладного уровня, уровня звена данных и физического уровня. Такая структура широко применяется для систем реального времени.

В двунаправленной системе стек протоколов радиоинтерфейса построен по системе «ведущий-ведомый», при котором устройство считывания/опроса, определенное как ведущее, организует весь процесс связи. Радиоинтерфейс, построенный в соответствии с вышеперечисленными принципами, позволяет осуществлять одновременную работу многих устройств считывания/опроса и многих прикладных систем РЧИ, объединенных соответствующей телекоммуникационной системой.

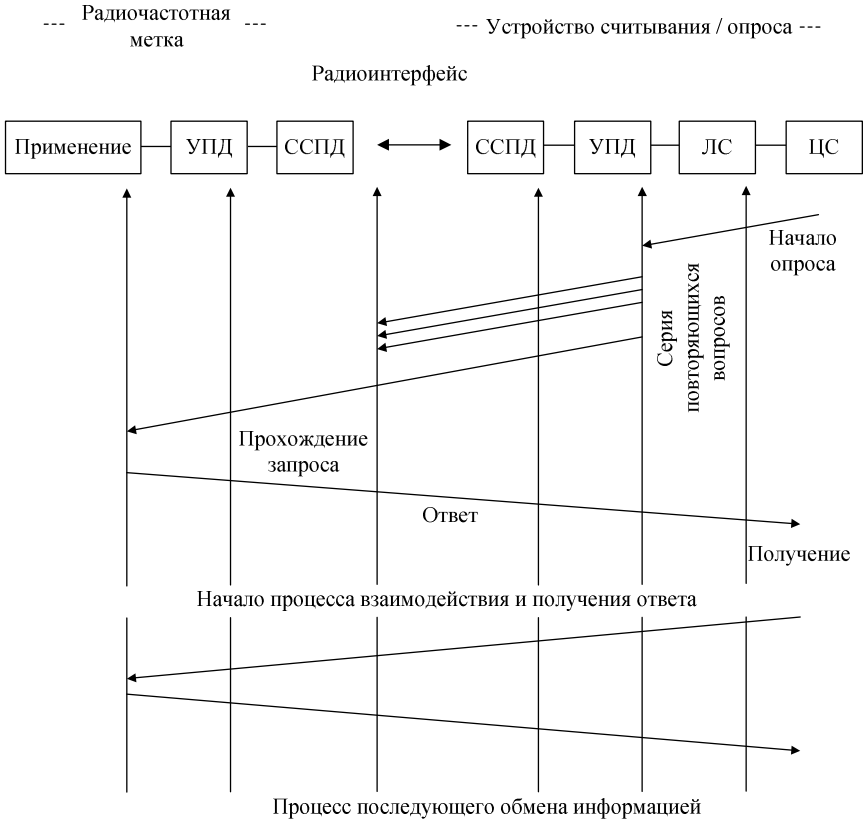


Рис. 3. Последовательности информационного обмена

Номинальное значение (или значения) конкретного параметра радиоинтерфейса системы РЧИ, обеспечивающее его соответствие выбранному стандартизованному радиоинтерфейсу, должно быть записано в явном виде и с указанием предельных допустимых отклонений от номинального значения. В случае установления диапазона значений параметра, должны быть указаны верхний и нижний предел значений диапазона.

Использование различных рабочих частот в системах РЧИ диктуется практической необходимостью. В связи с этим, для минимизации затрат, связанных с модернизацией и заменой оборудования, а также для снижения издержек производства за счет унификации узлов оборудования, выполняющих одинаковые функции в системах РЧИ, работающих на разных частотах, протоколы взаимодействия были (по возможности) унифицированы.

Двунаправленная система требует, как отправления, так и получения сигнала одной или обеими сторонами (устройством считывания/опроса и радиочастотной меткой). Большинство систем РЧИ являются

двунаправленными, вне зависимости от того, производят они операции только чтения или чтения/записи. При отсутствии специального указания системы РЧИ по умолчанию относятся к двунаправленным системам.

В однонаправленных системах передача информации осуществляется только одной, а прием – другой стороной. В однонаправленных системах устройство считывания/опроса является пассивным радиоприёмным устройством и может не передавать никаких сигналов для того, чтобы начать операцию по обмену информацией (в противном случае эта система будет считаться двунаправленной, которая не должна создавать помехи другим стандартизованным меткам систем РЧИ на этой частоте.

Радиоинтерфейс систем РЧИ имеет два канала передачи – канал передачи от устройства считывания к радиочастотной метке и канал передачи от радиочастотной метки к устройству считывания.

Канал передачи от устройства считывания к радиочастотной метке целесообразно описывать следующими параметрами.

1. Рабочий диапазон частот.

Параметр должен определять диапазон частот, который будет использовать этот канал передачи данных.

1.1. Стандартизованная рабочая частота.

Параметр должен определять рабочую частоту, на которой устройство считывания и радиочастотная метка осуществляют связь. Указанное значение является центральной частотой модулированного сигнала или набора сигналов. Все устройства считывания/опроса и радиочастотные метки, использующие стандартизованный радиоинтерфейс, должны по умолчанию обеспечивать работу на стандартизованной рабочей частоте.

1.2. Рабочие каналы (для систем с расширенным спектром).

Системы РЧИ могут использовать несколько частот для передачи от устройства считывания к радиочастотной метке.

Параметр должен определять число и значение рабочих частот каналов передачи. Значения данных рабочих частот должны быть центральными частотами модулированных сигналов.

1.3. Отклонение рабочей частоты.

Параметр должен определять максимально допустимое отклонение значения несущей частоты системы РЧИ от указанного номинального значения рабочей частоты.

1.4. Частота переключения каналов(величина, обратная интервалу времени работы на каждом канале связи системы РЧИ).

1.5. Последовательность частотных скачков.

Параметр должен определять псевдослучайный список частот, в соответствие с которым происходит переключение несущей частоты канала связи передатчика системы РЧИ.

1.6. Ширина полосы частот сигнала передачи.

Параметр должен определять ширину полосы частот сигнала, использующего канал связи, который состоит из подканалов с шириной, равной установленному частотному шагу.

1.7. Минимальная ширина полосы пропускания приёмника.

Параметр должен определять минимально необходимую ширину спектра частот сигнала, прием которого обеспечивается приёмником.

1.8. Максимально допустимая эквивалентная изотропно-излучаемая мощность устройства считывания.

Параметр должен определять максимально допустимую эквивалентную изотропно-излучаемую мощность устройства считывания.

1.9. Паразитное излучение передатчика устройства считывания.

Параметр должен лимитировать побочные излучения устройства считывания, которые состоят из сигналов гармоник, субгармоник, интермодуляционных эффектов и других паразитных излучений, которые непреднамеренно генерируются устройством считывания.

1.10. Паразитные излучения передатчика устройства считывания в рабочей полосе частот.

Параметр должен лимитировать побочные излучения, имеющиеся в пре-делах рабочего диапазона частот.

1.11. Внеполосные паразитные излучения передатчика устройства считывания.

Параметр должен лимитировать внеполосные побочные излучения.

1.12. Спектральная маска передатчика устройства считывания.

Параметр определяется как максимально допустимая мощность сигнала или напряженность поля, излучаемого передатчиком устройства считывания, выраженная как функция частоты.

1.13. Время перехода от передачи к приёму.

Параметр должен определять максимально допустимый промежуток времени от момента завершения передачи сигнала ответа радиочастотной меткой устройству считывания до момента готовности радиочастотной метки к приему очередного сигнала устройства считывания.

1.14. Время перехода от приёма к передаче.

Параметр должен определять максимально допустимый промежуток времени от момента завершения приема сигнала устройства считывания радиочастотной меткой до момента готовности радиочастотной метки к передаче сигнала устройству считывания.

1.15. Время задержки срабатывания при включении режима передачи устройства считывания.

Параметр должен определять максимально допустимое время, необходимое для того, чтобы мощность передатчика устройства считывания увеличилась с 10% до 90% уровня от выходной номинальной мощности.

1.16. Время задержки срабатывания при выключении режима передачи устройства считывания.

Параметр должен определять максимально допустимое время, необходимое для того, чтобы мощность передатчика устройства считывания уменьшилась с 90% до 10% уровня от выходной номинальной мощности.

1.17. Модуляция.

Параметр должен определять способ модуляции сигнала несущей частоты кодированными данными. Способ модуляции должен описываться в общепринятых терминах и соответствовать общераспространенным типам модуляции (амплитудная манипуляция (ASK), фазовая манипуляция (PSK), частотная манипуляция (FSK), линейная амплитудная модуляция (AM) и частотная модуляция (FM)).

1.18. Скорость передачи элементов сигнала.

Параметр должен определять количество элементов сигнала, передаваемых в единицу времени, предназначенных для модуляции несущей частоты.

1.19. Допустимая погрешность скорости передачи элементов сигнала.

Параметр должен определять допустимое отклонение в скорости передачи элементов сигнала (измеряемой количеством элементов сигнала, передаваемых в единицу времени).

1.20. Коэффициент модуляции.

Параметр определяется как отношение разности максимальной (пиковой) $\boldsymbol{a}$ и минимальной $\boldsymbol{b}$ амплитуд сигнала к их сумме ($[\boldsymbol{a}-\boldsymbol{b}]/[\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}]$). Значение коэффициента модуляции может выражаться в процентах.

1.21. Коэффициент заполнения (для амплитудной манипуляции).

Параметр определяется как отношение продолжительности периода времени максимальной амплитуды сигнала к полному периоду сигнала.

1.22. Отклонение частоты (для частотной модуляции).

Параметр определяется как разность между максимально допустимой мгновенной частотой модулированного сигнала и его несущей частотой.

1.23. Кодирование данных.

Параметр определяет базовую схему представления кодируемого сигнала данных (т.е. преобразование логических битов в физические сигналы). Примерами являются методы двухуровневого кодирования (Манчестерский код, двухуровневая частотная модуляция с отметкой на нуле (FM0), двухуровневая частотная модуляция с отметкой на единице (FM1), дифференциальный Манчестерский код), код «без возвращения к нулю» (NRZ) и код «без возвращения к нулю – инвертированный» (NRZI).

1.24. Скорость передачи данных.

Параметр определяет количество логических битов, передаваемых в единицу времени, независимо от метода кодирования данных, выраженное в битах в секунду.

1.25. Допустимая погрешность скорости передачи данных.

Параметр определяет максимально допустимое отклонение скорости передачи данных от установленной номинальной скорости передачи данных, выраженное в частях на миллион.

1.26. Допустимая погрешность модуляции при передаче устройства считывания.

Параметр определяет максимально допустимую величину амплитуды вектора ошибки, измеренную в процессе передачи каждого элемента сигнала.

1.27. Заголовок передаваемого сообщения.

Параметр должен указывать конкретный адрес уровня 1 (физический уровень), независимо от уровня 2 (уровень звена данных). Параметр определяется как для немодулированного сигнала несущей частоты, так и для модулированного сигнала (в последнем случае это относится к каналу после кодирования).

1.28. Длина заголовка.

Параметр должен определять длину заголовка, измеряемую числом битов.

1.29. Сигнал заголовка.

Параметр определяет сигнал заголовка в том виде, в каком он имеется в канале передачи данных.

1.30. Синхронизирующая битовая последовательность.

Параметр определяет битовую последовательность, генерируемую устройствами физического уровня, которую приёмник использует для синхронизации принимаемого битового потока.

1.31. Синхронизирующая кадровая последовательность.

Параметр определяет битовую последовательность, генерируемую устройствами физического уровня, которая определяет начало пакета передаваемого сообщения на уровне звена данных (уровень 2).

1.32. Скремблирование.

Параметр определяет возможность применения операции преобразования всех битов передаваемого сигнала, выполняемой на физическом уровне с целью повышения качества приема за счет модификации спектра передаваемого сигнала.

1.33. Порядок передачи бит.

Параметр определяет, какие биты сигнала передаются в первую очередь – младший бит (LSB) или старший бит (MSB).

1.34. Режим пробуждения.

Параметр определяет, имеет ли радиочастотная метка возможность использовать режим пробуждения. В случае если использование режима пробуждения возможно, данный параметр:

a) используется для указания на то, что радиочастотная метка находится в зоне опроса, т.е. она может начинать сеанс обмена информацией с устройством считывания;

b) используется для переключения электронных цепей микросхемы радиочастотной метки из дежурного режима (или режима «сна») в режим передачи информации.

С помощью данного параметра появляется возможность экономить энергию внутреннего источника питания радиочастотной метки, а также оптимизировать количество активных радиочастотных меток в зоне опроса в любой момент времени с целью повышения скорости группового чтения системы РЧИ.

1.35. Поляризация.

Параметр определяет вид поляризации сигнала антенн системы РЧИ.

Параметры канала передачи от радиочастотной метки к устройству считывания.

Следующие параметры канала передачи от радиочастотной метки к считывателю имеют такие же определения как и параметры канала передачи от считывателя к метке (параметры 1.1 – 1.35).

1.1. Рабочий диапазон частот.

1.2. Стандартизованная рабочая частота.

1.3. Рабочие каналы.

1.4. Допустимая погрешность рабочей частоты.

1.5. Частота переключения каналов.

1.6. Последовательность частотных скачков

1.7. Ширина полосы частот сигнала передачи.

1.8. Максимально допустимая эквивалентная изотропно-излучаемая мощность излучающего устройства.

1.9. Паразитные излучения излучающего устройства.

1.10. Паразитные излучения излучающего устройства в рабочей полосе частот.

1.11. Внеполосные паразитные излучения излучающего устройства.

1.12. Спектральная маска излучающего устройства.

1.13. Временные характеристики.

1.14. Время перехода от передачи к приёму.

1.15. Время перехода от приёма к передаче.

1.16. Время задержки срабатывания при включении режима передачи излучающего устройства.

1.17. Время задержки срабатывания при выключении режима передачи излучающего устройства.

1.18. Модуляция.

1.19. Расширяющая последовательность.

1.20. Скорость передачи элементов сигнала.

1.21. Допустимая погрешность скорости передачи элементов сигнала.

1.22. Диапазон амплитудной манипуляции.

Параметр определяет для амплитудной манипуляции (включая амплитудную манипуляцию по методу включено/выключено) отношение максимальной (пиковой) амплитуды к минимальной амплитуде сигнала, модулированного методом амплитудной манипуляции.

1.23. Коэффициент заполнения.

1.24. Отклонение частоты (для частотной модуляции).

1.25. Кодирование данных.

1.26. Скорость передачи данных.

1.27. Допустимая погрешность скорости передачи данных.

1.28. Допустимая погрешность модуляции при передаче.

1.29. Заголовок передаваемого сообщения.

1.30. Длина заголовка.

1.31. Сигнал заголовка.

1.32. Синхронизирующая битовая последовательность.

1.33. Синхронизирующая кадровая последовательность.

1.34. Скремблирование.

1.35. Порядок передачи бит.

1.36. Поляризация.

1.37. Частота поднесущей.

Параметр определяет поднесущую частоту, используемую для передачи модулированного сигнала, содержащего передаваемые данные.

1.38. Отклонение поднесущей частоты.

Параметр определяет максимально допустимое отклонение поднесущей частоты от ее центрального значения. Выражается в процентах или частях на миллион от значения поднесущей частоты.

1.39. Модуляция поднесущей частоты.

Параметр определяет тип модуляции, применяемый для формирования сигнала, содержащего данные и передаваемого на поднесущей частоте. Тип модуляции должен соответствовать общепринятым типам и описываться общепринятыми терминами (см. п.1.17).

1.40. Минимальная ширина полосы пропускания приёмника радиочастотной метки.

Параметр определяет минимально допустимый рабочий диапазон частот, который должен иметь приёмник радиочастотной метки.

В системах РЧИ, использующих радиочастотные идентификационные метки (РИМ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ) достаточно часто применяется конструкция в виде отражательной линии задержки, содержащей один встречно-штыревой преобразователь (ВШП) ПАВ, соединенный с антенной, и систему отражателей в виде металлических полосок или канавок на поверхности кристалла [2]. Возможна также конструкция РИМ в виде согласованного фильтра фазо-кодо-манипулированного сигнала (ФКМ) [4,5], включающего в свой состав два ВШП.

РИМ на ПАВ применяются в двух разрешенных диапазонах частот 860-960 МГц и 2400-2483 МГц (ISM-диапазон) [3,4] или РИМ в новом диапазоне частот 5650-6425 МГц [6].

Антенна метки на ПАВ нагружена на ВШП, импеданс которого имеет ёмкостный характер (за основу взяты гибридные рамочные антенны [10], имеющие достаточно широкую рабочую полосу частот и обладающие достаточно хорошей эффективностью приема/передачи энергии). Такая антенна может быть спроектирована и изготовлена на подложке из стеклотекстолита FR-4 толщиной 0,6 мм, имеющей диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_r = 4.3$ и тангенс потерь $\mathrm{tg}\,\delta = 0.02$ в используемом диапазоне частот.

Для прямоугольной конфигурации излучающей пластины над диэлектриком ширина полосы пропускания равна [7]:

$$B = 3{,}77[(\varepsilon_r - 1)/\varepsilon_r^2](W/L)(t/\lambda),$$

где t – толщина диэлектрика, а W и L – габариты излучающей пластины.

Энергию, получаемую меткой, можно рассчитать по известной формуле [1]:

$$P_t = P_r(1-|\Gamma_r|^2)(1-|\Gamma_t|^2)K_p\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 G_r G_t,$$

где λ – длина волны; G_r–коэффициент усиления (КУ) антенны метки (АМ) приемника; G_t – коэффициент усиления антенны передатчика; $(1-|\Gamma_r|^2)$ – эффективность отражения АМ; $(1-|\Gamma_t|^2)$ – эффективность отражения антенны считывателя; R – расстояние между меткой и опросчиком; $P_t(1-|\Gamma_t|^2)G_t$ – эквивалентная излучаемая мощность считывателя; K_p– коэффициент потерь поляризации (PLF).

В случае идеального расположения плоскости АМ к плоскости антенны считывателя (K_p =1) получим:

$$R = \frac{\lambda}{4\pi}\sqrt{\frac{P_t(1-|\Gamma_t|^2)G_t}{P_r}(1-|\Gamma_r|^2)G_r}$$

Для антенны коэффициент отражения равен [3, 4]:

$$\Gamma = \frac{Z_{At} - Z_{Lt}}{Z_{At} + Z_{Lt}},$$

Z_{At} – входной импеданс антенны, Z_{Lt} - характеристический импеданс питающей линии.

Рассмотрим формулу динамического потребления мощности: $P_{dyn} = \alpha f C V^2$, где α – коэффициент активности; f– скорость передачи данных; C– суммарная паразитная емкость; а V– напряжение питания.

Коэффициент активности α представляет собой ожидаемое число переходов от 0 к 1 за время передачи данных. Средняя скорость передачи данных f является частотой синхронизации системы. Динамическое потребление мощности определяется тремя основными параметрами: активностью переключений, емкостью и квадратом напряжения питания.

Без учета импульсных помех коэффициент активности α является вероятностью, с которой происходят переходы уровней в течение одного бита данных.

Для случайных сигналов максимальная величина коэффициента активности α равна 0,5; для простых логических вентилей она составляет от 0,4 до 0,5, а для конечных автоматов – находится в пределах от 0,08 до 0,18 [8,9].

Список литературы

1. Bohm J., Heimann R.B., Hengst M., Roewer R., Schindler J. Czochralski growth and characterization of piezoelectric single crystals with langasite structure: $La_3Ga_5SiO_{14}$ (ЛГС), $La_3Ga_{5.5}Nb_{0.5}O_{14}$ (LGN), and $La_3Ga_{5.5}Ta_{0.5}O_{14}$ (LGT) // J. Crystal Growth. 1999. V. 204. P. 128-137.

2. Morgan D. Surface Acoustic Wave Filters. L.: Academic Press, 2007. 448 c.

3. Harma S., Arthur W., Hartmann C., Maev R.G., Plessky V.P. Inline SAW RFID tag using time position and phase encoding // IEEE Trans., 2008. V. UFFC-55, №. 8. P. 1840.

4. Plessky V., Reindl L. Review on SAW RFID tags // IEEE Trans. 2010. V. UFFC-57 №. 3. P. 654.

5. Дмитриев В.Ф., Койгеров А.С. Исследование радиоидентификаторов на поверхностных акустических волнах с заданными корреляционными свойствами // РЭ, 2011. Т. 56. № 10. С. 1268.

6. Plessky V., Lamothe M., Davis Z., Suchkov S. SAW tags for the 6-GHz range // IEEE Trans. 2014. V. UFFC-61. № 12. P. 2149.

7. Олинер А.А. Поверхностные акустические волны. М.: Мир, 1981. С. 1-392.

8. Gerdes R.J., Wagner C.E. Scanning Electron Microscopy of Resonating Quartz Crystals // Appl. Phys. Lett., 1971. V. 18. P. 39-41

9. Bahadur H., Hepworth A., Kall V.K., Parshad R. Electron Contrast Effects from Oscillating Quartz Crystals by the Scanning Electron Microscope // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. 1978. V. SU-25. P. 309-312.

10. Chen S.-Y., Hsu P. Hybrid Loop Antenna for 2.4-GHz RFID Tags. // Proc. 2005 IEEE International symposium on antennas and propagation. N.Y.: IEEE, 2005. P. 1045.

Акиншин Николай Степанович, д-р техн. наук, профессор, начальник отдела, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тула, АО Центральное конструкторское бюро аппаратостроения,

Мацур Игорь Юрьевич, старший научный сотрудник, cdbae@cdbae.ru, Россия, Москва, Экспертно-аналитический центр,

Еркин Денис Васильевич, адъюнкт, cdbae@cdbae.ru, Россия, Пенза, Пензенский артиллерийский инженерный институт имени Н.Н. Воронова

MODEL OF OPERATION AND PARAMETERS OF THE RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION SYSTEM

O.N. Akinshin, I.Y. Matsur, D.V. Erkin

A model of the structural scheme of radio frequency identification (RFI) of control objects has been developed. A functional diagram of the sequence of information exchange for communication systems of the basic logistics model is presented. The parameters of the transmission channel from the reader to the radio frequency tag and back are determined.

Key words: radio frequency tag, model, block diagram, identification, data transmission, reading device, radio interface, algorithm.

Akinshin Nikolay Stepanovich, doctor of technical Sciences, professor, head of Department, cdbae@cdbae.ru, Russia, Tula, JSC Central Design Bureau of Apparatus Engineering,

Matsur Igor Yurievich, senior researcher, cdbae@cdbae.ru, Russia, Moscow, Expert-analytical center,

Erkin Denis Vasilyevich, adjunct, cdbae@cdbae.ru, Russia, Penza, Penza Artillery Engineering Institute named after N.N. Voronova

УДК 621.396

МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРИЗНАКОВ ОБЪЕКТОВ И ИСТОЧНИКОВ РАДИОМОНИТОРИНГА

П.В. Заика, П.А. Агеев, А.М. Кудрявцев

В статье рассматриваются основные информационные признаки объектов и источников радиомониторинга.

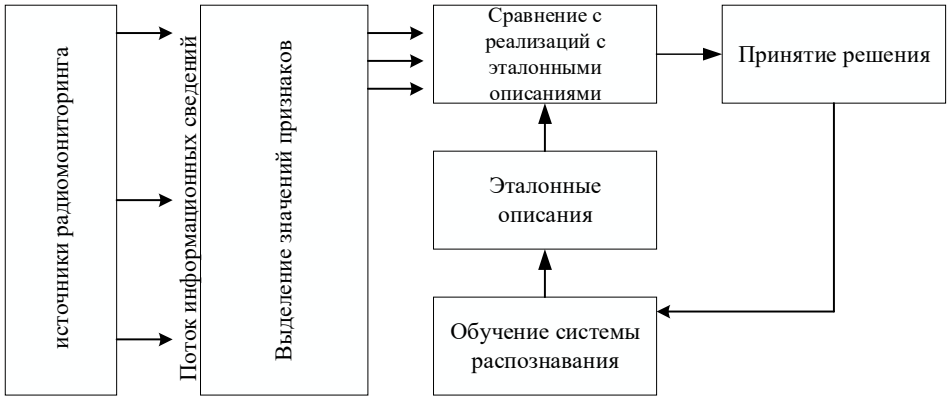
Ключевые слова: радиомониторинг, распознавание, информационный признак.

Преимущества систем и средств радиосвязи, активное внедрение новых информационных технологий, относительно низкие затраты на телекоммуникационные услуги в диапазоне радиоволн, привели к тому, что они заняли ведущее место среди подобных услуг во всем мире. Следствием этого явилось резкое увеличение количества и плотности активно работающих систем радиосвязи различного назначения. Для осуществления контроля за деятельностью области эффективного использования радиочастотного спектра в Российской Федерации созданы службы радиомониторинга. Основными направлениями их деятельности являются [1-2]:

- измерение параметров электромагнитной обстановки;
- измерение параметров радиоэлектронных средств, влияющих на электромагнитную совместимость и проверка их соответствия разрешениям на эксплуатацию радиоэлектронных средств;
- измерение границ зон уверенного приема в том числе при вводе радиоэлектронных средств в эксплуатацию;
- -экспертиза электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в реальной электромагнитной обстановке;
- поиск, радиопеленгование и идентификация источников радиоизлучений и объектов, в интересах которых они функционируют для определения причин и источников радиопомех;
- выявление работы радиоэлектронных средств без разрешений [2].

Для обнаружения и распознавания объектов и источников службами радиомониторинга используются признаки. Под информационными признаками понимают только те качественные и количественные характеристики и параметры средств, систем связи и радиотехнического обеспечения, использование которых обеспечивает правильное распознавание объектов и источников радиомониторинга.

В качестве объектов распознавания в радиомониторинге выступают сигналы, отдельные радио и радиотехнические станции, радиосети и направления связи, радиотехнические и системы связи, объекты мониторинга, их состояния и деятельность [2]. Общий вид структурной схемы распознавания представлен на рисунке.



Структурная схема обобщенного алгоритма распознавания

Из определения следует, что параметр или характеристику можно рассматривать в качестве информационного признака объекта распознавания. Проявление множества информационных признаков для подсистемы добывания комплексов радиомониторинга осуществляется через функционирование радиоэлектронных средств (РЭС) в виде параметров организации канала связи, формирования и преобразования радиосигнала, а также формируемых на их основе структурно-статистических характеристик.

С помощью аппаратуры постов контроля наземных, воздушных и спутниковых линий связи в различных диапазонах частот осуществляется регистрация следующих параметров функционирования РЭС: рабочей частоты; вида передачи; времени работы источника радиоизлучения (ИРИ); типа применяемой антенной системы; поляризации радиоволн; применяемых стандартов и протоколов радиосвязи; позывных, телефонных и электронных адресов; индивидуальных признаков оборудования; содержания сообщений, служебного и оперативного радиообмена; особенностей преобразования сигнала (вида модуляции, уплотнения, шифрования, многостанционного доступа) и др.

Посты станций мониторинга радиотехнических систем определяют следующие параметры работы средств радиотехнического обеспечения (РТО): направление и скорость вращения диаграммы направленности исследуемой радиолокационной станции (РЛС); поляризация радиоволн; параметры излучаемых импульсов (период, длительность, количество в се-

рии, наличие модуляции или манипуляции); ширина спектра излучения; частота и закон модуляции несущей; количество и разнос частотных каналов; форма сигнала для РЛС с непрерывным излучением и др.[2]

При контроле работы систем радионавигации дополнительно регистрируются: временные соотношения принятых излучений и их цикличность; закон и порядок переключения частотных каналов и модулирующих частот; применяемые коды или позывные для каждой отдельной станции или цепи в целом.

При радиотехническом контроле систем радиотелеуправления регистрируются: структура команды управления; временные параметры команды (длительность команды, длительность элементарных посылок и их скважность); модуляционные и командные частоты; частота опорного сигнала и команды [3].

Средства местоопределения в составе радиопеленгаторных постов образуют радиопеленгаторные сети систем радиомониторинга. Получаемые сведения включают измеренные пеленги, номиналы частот радиосигналов и время их обнаружения. В подсистему обработки радиомониторинга поступают координаты ИРИ и значения пеленгов, номиналы частот и времени.

Посты технического анализа позволяют добывать, проявляющиеся в структуре, характеристиках и особенностях формирования радиосигнала в результате функционирования РЭС в составе объектов радиомониторинга. Для решения этих задач станции технического анализа определяют следующие характеристики и параметры функционирования РЭС: диапазон используемых частот; вид излучения (импульсное, непрерывное, квазинепрерывное); особенности преобразования сигнала (вид модуляции, уплотнения, шифрования, многостанционного доступа, типы протоколов связи и передачи данных, тип и особенности помехоустойчивого кодирования); особенности амплитудно-частотного и частотно-временного представления радиоизлучения; длительность и форму импульсов; частоту (период) повторения импульсов; структуру посылок сигнала; поляризацию излучения; количество рабочих каналов и разнос между ними; скорость вращения антенны и др. [4].

Суммарную последовательность параметров функционирования множества РЭС целесообразно рассматривать как суперпозицию параметров радиоэлектронной обстановки (РЭО). В формализованном виде параметры РЭО представлены упорядоченным по структуре и времени множеством:

$$S_{t_{\text{рэс}}\,\text{РЭО}} = \bigcup_{m=1}^{M}\bigcup_{l=1}^{L}\bigcup_{z=1}^{Z}\bigcup_{w=1}^{W} S_{t_{\text{рэс}}\,\text{РС}m} S_{t_{\text{рэс}}\,\text{СЛС}l} S_{t_{\text{рэс}}\,\text{РТО}z} S_{t_{\text{рэс}}\,\text{МС}w}, \quad (1)$$

где m=1,2…,M; k=1,2…,K; z=1,2…,Z; w=1,2…,W; $S_{t\text{рэс РС}}$ – упорядоченное множество параметров функционирования РЭС наземных и воздушных линий радиосвязи за время их работы $t_{\text{рэс}}$; $S_{t\text{рэс СЛС}}$ – упорядоченное множество параметров функционирования РЭС спутниковых линий связи за время их работы $t_{\text{рэс}}$; $S_{t\text{рэс РТО}}$ – упорядоченное множество параметров функци-

онирования РЭС систем РТО за время их работы $t_{\text{рэс}}$; $S_{t\text{рэс МС}}$ – упорядоченное множество параметров функционирования РЭС источников мешающих сигналов за время их работы $t_{\text{рэс}}$.

Выражение (1) в общем смысле представляет универсум параметров РЭО, выступающих в качестве информационных признаков, который включает в себя все возможные множества параметров функционирования РЭС за время их работы $t_{\text{рэс.}}$

Для формирования модели информационных признаков введем следующие обозначения основных параметров и характеристик функционирования РЭС: f – частота (МГц); t – метка времени (дд.мм.гг чч.мм.сс); CS – позывной (текстовая строка); V – вид передачи (текстовая строка); T – тип РЭС (РТС) (текстовая строка); M – материалы мониторинга (текстовый или аудио файл); N – количество корреспондентов (целое число); λ – интенсивность обмена (сообщений/час); τ_u – длительность импульсов (мкс); T_u – период следования импульсов (мкс); $_{\Delta}\Theta$ – ширина диаграммы направленности антенны (град); $v_{вр.}$ – скорость вращения антенны (об./мин); $\tau_{си}$ – длительность серии импульсов (мкс); txt – примечание (текстовая строка), XY – координаты (засечки, пеленги) l – приоритет абонента; main - главная станция, истина/ложь; RN – номер ИРИ, целое число; SN – номер сети, целое число. Таким образом все типы радиоэлектронных средств, подлежащих радиомониторингу могут быть охарактеризованы следующим обобщенным набором признаков [5]:

$$I = \{f, XY, t, V, CS, T, \tau_{\text{и}}, T_{\text{и}}, \ldots, l, RN, SN, main, txt\}. \quad (2)$$

Кроме этого, количественными характеристиками совокупности радиоизлучений объектов являются:

общее число отдельных источников излучений;

плотность распределения значений отдельных параметров;

максимальные значения и диапазон значений параметров (занимаемый частотный диапазон, динамические диапазоны);

коэффициент корреляционной связи между отдельными параметрами и видами радиоизлучений;

суммарный поток радиоэлектронных излучений и его вариации во времени;

плотность размещения источников излучения на площади, занимаемой объектом;

количественные соотношения между различными видами радиоизлучений [3].

В заключении следует отметить, что для распознавания объектов и источников необходимо решение таких основных задач:

1. Составление эталонных описаний классов распознавания;

2. Установление правил принятия решения о классе обнаруженных РЭС после сравнения измеренных параметров излучений РЭС с эталонными описания;

3. Определения перечня параметров и наличия в аппаратуре радиомониторинга устройств, обеспечивающих измерение этих параметров излучений РЭС.

Список литературы

1. Деев В.В., Копичев О.А., Кудрявцев А.М. Логико-лингвистический подход к моделированию электромагнитной обстановки на основе гибридных автоматов // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. СПб.: Издательский дом Медиа Паблишер, 2016. № 2. С. 43–47.

2. Липатников В.А., Царик О.А. Методы радиоконтроля. Теория и практика: монография. СПб.: ГНИИ. НАЦРАЗВИТИЕ, 2018. 608 с.

3. Гуляев В.П. Анализ демаскирующих признаков объектов информатизации и технических каналов утечки информации: учебно-методический комплект. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2014. 164 с.

4. Меньшаков Ю.К. Теоретические основы технических разведок: учебное пособие / под ред. Ю.Н. Лаврухина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 536 с.

5. Иванов А.А., Кудрявцев А.М., Смирнов А.А., Удальцов Н.П. Способ «трассовой» обработки данных радиомониторинга среды со случайными параметрами // Информация и Космос. 2009. №4. С. 10-14.

Заика Павел Валентинович, преподаватель, pashasever@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Агеев Павел Александрович, преподаватель, pol18deligne@rambler.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного,

Кудрявцев Александр Михайлович, д-р воен. наук, профессор, pol18deligne@rambler.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного

INFORMATION SIGN MODEL OF OBJECTS AND SOURCES OF RADIOMONITORING

P.A. Ageev, P.V. Zaika, A.M. Kudrayvcev

The article discusses the main informational features of objects and sources of radio monitoring.

Key words: radio monitoring, recognition, information sign.

Zaika Pavel Valentinovich, lecturer, pashasever@mail.ru, Russia, Sankt-Petersburg, Military academy of telecommunications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Bydyonny,

Ageev Pavel Aleksandrovich, lecturer, pol18deligne@rambler.ru, Russia, Sankt-Petersburg, Military academy of telecommunications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Bydyonny,

Kudrayvcev Aleksandr Mikhailovich, doctor of military sciences, professor, pol18deligne@rambler.ru, Russia, Sankt-Petersburg, Military academy of telecommunications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Bydyonny

УДК 620.17

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ НА СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

П.С. Гончаров, М.В. Житный, А.Л. Копейка, Э.Г. Синельников, А.М. Денисов

В статье представлены результаты экспериментальных исследований влияния воздействия ударников, имитирующих малоразмерные твердые частицы космического мусора, на электрические характеристики солнечных элементов космического назначения. Описана используемая лабораторная база и порядок проведения измерений. Показаны типовые повреждения солнечных элементов в результате кинетического воздействия малоразмерных твердых частиц. Приведены коэффициенты деградации электрических характеристик солнечных элементов.

Ключевые слова: космический мусор, солнечный элемент, солнечная батарея, космический аппарат.

Рост числа количества космических аппаратов, выводимых в околоземное пространство, привел к возникновению проблемы повреждения действующих космических аппаратов твердыми частицами космического мусора (ЧКМ), представляющими собой фрагменты ракетно-космической техники и образующимися в результате разрушения космических аппаратов. Столкновение космического аппарата (КА) с такой твердой частицей с высокой вероятностью приводит к повреждению его элементов, а в ряде случаев и к выводу его из строя. Одним из элементов КА, наиболее подверженных воздействию ЧКМ, является солнечная батарея (СБ), что обусловлено достаточно большой площадью СБ, размер которой определяется требуемым уровнем степени преобразования солнечного излучения в электрическую энергию, необходимую для функционирования КА.

Следует отметить, что в отличие от повреждения других элементов КА, повреждение одного и нескольких элементов или сборок элементов СБ не приводит к немедленному выходу КА из строя, что связано с особенностями конструкции самой СБ. Так, например, при анализе опыта эксплуатации солнечных батарей служебного модуля международной космической станции был выявлен отказ ряда створок некоторых генераторов одной из панелей СБ, что в конечном счете привело не к полному выходу панели СБ из строя, а лишь к соответствующему снижению генерируемого тока [1].

Однако, в зависимости от степени повреждения СБ, недостаточный уровень электрической энергии получаемой бортовым оборудованием КА от СБ может существенно сократить срок его активного существования или ограничить возможность его использования в соответствии с целевым назначением. При этом размеры и скорость твердой частицы техногенного происхождения оказывают значительное влияние на характер повреждения как отдельных элементов СБ, так и СБ в целом. Так, проведенные исследо-

вания показали, что в случае высокоскоростного воздействия (порядка 15-20 км/с) микрометрических твердых частиц на элемент СБ вместо сквозного пробития возникает его частичное повреждение, однако возникающий при этом эффект шунтирования, приводит к резкому снижению полезной мощности, обеспечиваемой сборкой, в которую входит этот элемент, а в ряде случаев и к его короткому замыканию [2].

Скорости частиц, находящихся в околоземном пространстве, располагаются в пределах достаточно большого диапазона. Вместе с тем, результаты расчетов вероятных скоростей встречи ЧКМ и КА, проведенных с использованием специальной методики [3], позволяют сделать вывод о возможности столкновения ЧКМ и КА и при малых значениях относительных скоростей встречи, находящихся в диапазоне от 0,1 до 1 км/с. При этом в зависимости от конструкции и размеров КА столкновения с частицами, имеющими невысокие скорости, также могут приводить к выводу КА из строя. Так, например, находящие в настоящее время широкое применение малоразмерные космические аппараты типа CubSat, в силу предъявляемых к ним ограничений по массе [4], не могут иметь защиту от ударного воздействия ЧКМ и поэтому гораздо сильнее подвержены такому воздействию. При этом столкновение такого КА с частицей, обладающей скоростью, превышающей 1 км/с, с высокой вероятностью приведет к полному выводу из строя космического аппарата. Проведенные эксперименты показали, что при столкновении такого КА с ЧКМ при разных значениях относительных скоростей встречи происходит полное разрушение КА с образованием большого числа фрагментов [5].

Таким образом, данные обстоятельства определили условия проведения настоящих экспериментальных исследований, а также выбор экспериментальной установки.

В качестве условий для проведения экспериментальных исследований воздействия ударников (имитаторов ЧКМ) на солнечный элемент (СЭ) СБ приняты следующие:

температура окружающей среды, ^{0}С: 25 ± 5;
относительная влажность воздуха, %: 65 ± 15;
атмосферное давление, кПа: 101,3±4,0;
диаметр ударника, мм: 2,5;
материал ударника: сталь ШХ 9 (ШХ 15);
скорость ударника, м/с: 210 ± 1%.

Значение скорости ударника, которое необходимо обеспечивать в ходе проведения экспериментальных исследований, определялось в серии предварительных испытаний, проводимых для оценивания воздействия ударника на ячейку аналогичного элемента СБ, и обусловливалось необходимостью выполнения требования сквозного пробития ячейки без ее полного разрушения. В рамках проводимых исследований под минимальной скоростью сквозного пробития принималось значение скорости встречи ударника с мишенной обстановкой, при котором вся запасенная кинетическая энергия затрачивается только на сквозное пробитие. Таким образом, в рамках предварительных испытаний было определено значение минималь-

ной скорости сквозного пробития ячейки исследуемого образца ударником, размеры и масса которого аналогичны характеристикам ударника, используемого в основном эксперименте. Определение минимальной скорости сквозного пробития проводилось в соответствии с аттестованной методикой [6]. На основании полученного значения минимальной скорости сквозного пробития было принято значение скорости ударника для основной экспериментальной программы, равное 210 м/с.

В качестве экспериментальной установки, имитирующей кинетическое воздействие ЧКМ на элемент СБ, использовался экспериментальный баллистический комплекс БС-3. Разгон ударника производился с использованием входящей в комплекс газодинамической импульсной пневматической метательной установки, упрощенная схема которой представлена на рис.1.

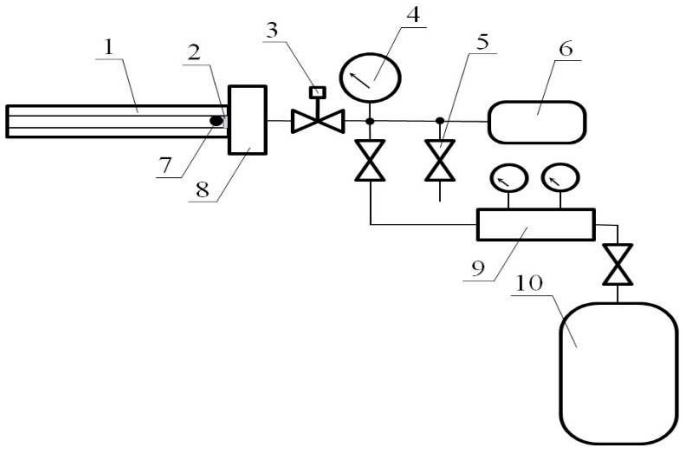


Рис. 1. Схема пневматической метательной установки: 1 – ствол; 2 – фиксатор положения метаемого тела, находящегося в казенной части ствола установки; 3 – электропневмоклапан; 4 – манометр; 5 – вентиль для сброса остаточного давления из системы; 6 –накопитель; 7 – метаемое тело; 8 – устройство сопряжения пневмосистемы и ствола; 9 – редуктор; 10 – сосуд высокого давления

Отличительными особенностями примененной газодинамической импульсной пневматической метательной установки являются следующие:

высокая точность воспроизведения скорости ударника (разброс скорости ударника не превышает 1% от заданной величины скорости ударника);

возможность обеспечения скорости ударника в диапазоне от 80 до 800 м/с;

возможность использования в качестве рабочего тела различных газов (при этом использование сжатого воздуха в качестве рабочего тела обеспечивает минимальную стоимость эксперимента);

высокая экологичность;

возможность использования ударников различного размера (что достигается применением сменных стволов и специальных ведущих устройств);

возможность имитации многоэлементного осколочного поля, возникающего при пробитии первого экрана разнесенной защиты и фрагментации ударника, что достигается за счет использования ударника, сформированного из готовых элементов, каждый из которых является имитатором элементов осколочного поля;

малое время подготовки к проведению эксперимента.

Измерение скорости ударника осуществлялось в соответствии с аттестованной методикой определения скорости метаемого тела [6].

Испытываемые образцы представляют собой шесть объединенных кремниевых ячеек, имеющих общее электрическое соединение и размещенных на стекловолоконной сетчатой подложке. Размер каждой ячейки составляет 15 на 15 мм.

Солнечные элементы и несущая панель имеют сложную конструкцию, состоящую из нескольких слоев, выполненных из различных материалов. В общем виде структура солнечного элемента может быть представлена в следующем виде (рис. 2).

Испытываемые в настоящем исследовании образы СЭ представляют собой совокупность слоев под номерами №1 – №5, что обусловливается целями проведения экспериментальных исследований.

К основным электрическим характеристикам солнечного элемента, определяемых в ходе экспериментальных исследований, относятся следующие:

плотность тока короткого замыкания $J_{\text{к.з}}, \frac{мА}{см^2}$;

напряжение холостого хода $U_{x.x}$, В;

плотность тока в точке максимальной мощности $J_{P\max}, \frac{мА}{см^2}$;

напряжение в точке макс. мощности $U_{P\max}$;

максимальная мощность $P_{\max}$, Вт/м^2.

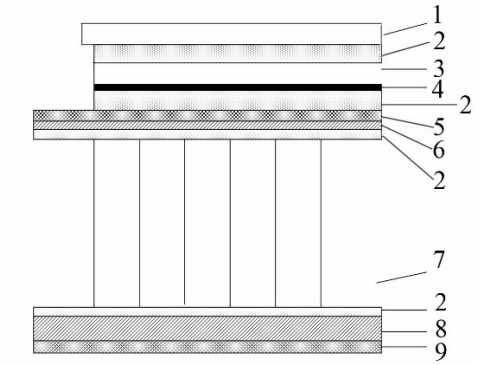


Рис. 2. Общая структура солнечного элемента: 1 – стеклянное покрытие; 2 – слой клея; 3 – пластина полупроводника; 4 – слой припоя на тыльной стороне пластины полупроводника; 5 – изолирующий слой из стекловолокна; 6 – алюминиевая плоская пластинка над сотовым слоем; 7 – сотовая панель; 8 – алюминиевая пластина под сотовым слоем; 9 – слой терморегулирующего покрытия

Измерение характеристик образцов до проведения экспериментов и после его проведения осуществлялось с использованием лабораторной установки, моделирующей солнечное излучение, измерительная схема которой приведена на рис. 3.

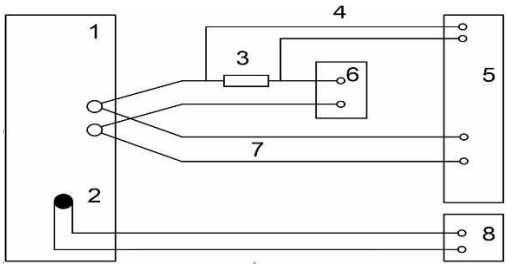


Рис. 3. Измерительная схема лабораторной установки: 1 – образец СЭ; 2 – температурный датчик; 3 – прецизионный резистор; 4 – цепь измерения тока; 5 – измеритель на базе ЭПН; 6 – ЭПН; 7 – цепь измерения напряжения; 8 – термостабилизирующее устройство

Лабораторная установка включает в себя следующие основные элементы, в соответствии с требованиям, изложенным в [4]:

– эталонный фотоэлектрический прибор, соответствующий характеристикам испытываемых образцов;

– средство измерения температуры эталонного прибора и испытываемых образцов;

– имитатор солнечного излучения, спектр которого близок к спектру солнечного излучения и рабочая зона измерений которого превышает зону, занимаемую испытываемым образцом;

– термостабилизирующее устройство, предназначенное для поддержания постоянной температуры испытываемого образца и эталонного прибора, и включающее в себя датчик температуры и устройство охлаждения;

– радиометр;

– электронная программируемая нагрузка типа АТН-8120 с напряжением питания до 120В, током нагрузки до 240А, потребляемой мощностью до 1200Вт, предназначенная для обеспечения снятия вольт-амперной характеристики (ВАХ) испытываемого образца СБ.

Применение термостабилизирующего устройства является обязательным требованием, что обусловлено сильным влиянием температуры исследуемого образца на определяемую вольт-амперную характеристику. Так, с ростом температуры исследуемого образца, которая естественным образом повышается в условиях освещенности мощным источником светового излучения при отсутствии термостабилизирующего устройства, будет происходить уменьшение мощности исследуемого элемента.

Определение ВАХ проводилось с учетом требований, предъявляемых к испытаниям при постоянном искусственном солнечном излучении, изложенным в [4], и в рамках проводимого исследования заключалось в выполнении следующих основных этапов:

калибровка лабораторной установки для условий, когда размеры испытываемых образцов соответствуют используемому эталонному прибору, после проведения мероприятий по термостабилизации эталонного прибора;

помещение в лабораторную установку испытываемого образца и его термостабилизация;

измерение вольт-амперных характеристик и температуры испытываемого образца;

проведение ударного воздействия на исследуемые образцы с помощью пневматической баллистической установки, заключающегося в ударном повреждении одной ячейки СБ;

определение ВАХ исследуемого образца после проведения ударного воздействия в соответствии с [7] (данные заносятся в протокол испытания);

обработка результатов измерений;

определение коэффициентов деградации характеристик солнечного элемента.

Определение коэффициентов деградации электрических характеристик СЭ принято рассчитывать на основании следующих выражений:

коэффициент деградации плотности тока короткого замыкания

$$k_{J\text{к.з}} = \frac{J_{\text{к.з}}^{\text{возд}}\left(X_{\text{возд}}\right)}{J_{\text{к.з}}^{0}},$$

где $J_{\text{к.з}}^{\text{возд}}$ – плотность тока короткого замыкания СЭ после испытаний; $X_{\text{возд}}$ – параметры ударника; $J_{\text{к.з}}^{0}$ – плотность тока короткого замыкания СЭ до испытания;

коэффициент деградации напряжения холостого хода

$$k_{U_{\text{х.х}}} = \frac{U_{\text{х.х}}^{\text{возд}}\left(X_{\text{возд}}\right)}{U_{\text{х.х}}^{0}},$$

где $U_{\text{х.х}}^{\text{возд}}$ – напряжение холостого хода СЭ после испытания; $X_{\text{возд}}$ – параметры ударника; $U_{\text{х.х}}^{0}$ – напряжение холостого хода СЭ до испытания;

коэффициент деградации плотности тока в точке максимальной мощности

$$k_{J_{P\max}} = \frac{J_{P\max}^{\text{возд}}\left(X_{\text{возд}}\right)}{J_{P\max}^{0}},$$

где $J_{P\max}^{\text{возд}}$ – плотность тока короткого замыкания СЭ в точке максимальной мощности после испытания; $X_{\text{возд}}$ – параметры ударника; $J_{P\max}^{0}$ – плотность тока короткого замыкания СЭ в точке максимальной мощности до испытания;

коэффициент деградации напряжения в точке максимальной мощности

$$k_{U_{P\max}} = \frac{U_{P\max}^{\text{возд}}\left(X_{\text{возд}}\right)}{U_{P\max}^{0}},$$

где $U_{P\max}^{\text{возд}}$ – напряжение холостого хода СЭ в точке максимальной мощности после испытания; $X_{\text{возд}}$ – параметры ударника; $U_{P\max}^{0}$ – напряжение холостого хода СЭ в точке максимальной мощности до испытания;

коэффициент деградации максимальной мощности

$$k_{P\max} = \frac{P_{\max}^{\text{возд}}\left(X_{\text{возд}}\right)}{P_{\max}^{0}},$$

где $P_{\max}^{\text{возд}}$ – максимальная мощность СЭ после испытания; $X_{\text{возд}}$ – параметры ударника; $P_{\max}^{0}$ – максимальная мощность СЭ до испытания.

В ходе экспериментальных исследований были проведены испытания 50 тестовых образцов. Обработка полученных результатов проводилась на основе методического подхода, включающего определение следующих основных параметров:

среднего значения исследуемого параметра:

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i ,$$

где x_i – измеренное значение исследуемого параметра (напряжение холостого хода, ток короткого замыкания); n – число значений, принятых для расчетов.

выборочного среднего квадратического отклонения отдельного измерения $\left(S_x\right)$:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{x}\right)^2}{n-1}};$$

значения средней квадратической ошибки результатов всех измерений $\left(S_{\overline{x}}\right)$:

$$S_{\overline{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{x}\right)^2}{n\,(n-1)}};$$

величины доверительного интервала с учетом выбранного значения коэффициента Стьюдента:

$$\Delta x = t \cdot S_{\overline{x}};$$

значения исследуемого параметра с учетом найденного доверительного интервала (10):

$$x = \overline{x} \pm \Delta x .$$

Исключение грубых погрешностей измерений реализовано на основе критерия Граббса [8].

При проведении моделирования воздействия имитаторов частиц космического мусора на испытываемые образцы солнечных элементов, используемых в составе солнечной батареи космического аппарата, были получены повреждения солнечных элементов, имеющие различный характер. Основные виды повреждений представлены на рис. 4.

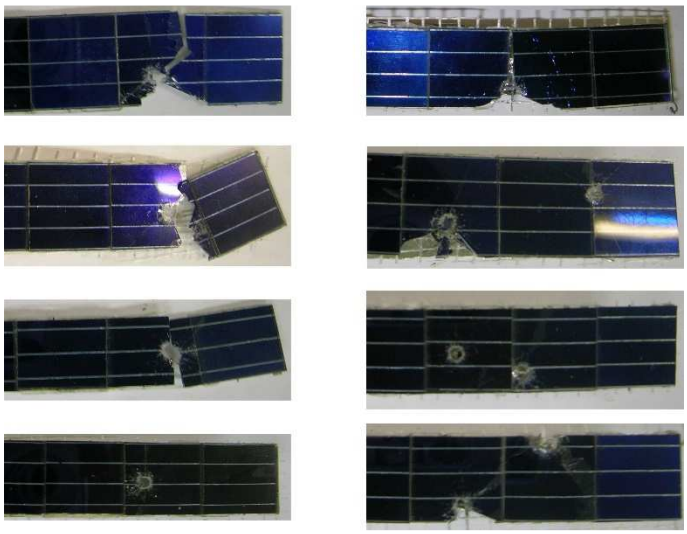


Рис. 4. Типовые повреждения образцов СЭ

Типовая вольт-амперная характеристика одного из испытываемых образцов СЭ, снятая до и после проведения испытаний, представлена на рис. 5.

Результаты обработки данных, полученных в ходе проведения экспериментальных исследований воздействия имитаторов частиц космического мусора на солнечные элементы космических аппаратов, приведены в табл. 1, 2.

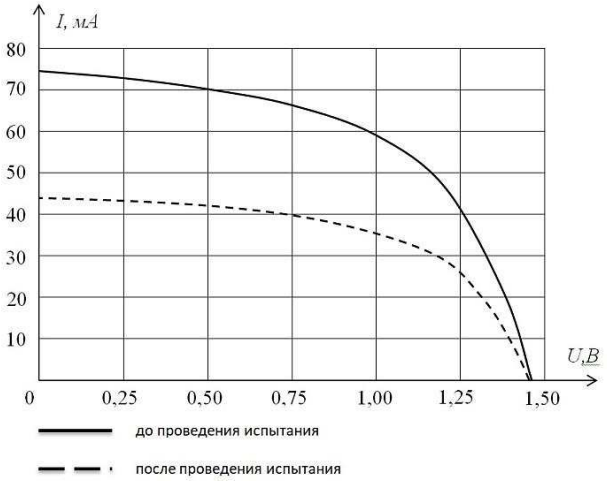


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики образца СЭ

Таблица 1

Изменение основных электрических характеристик СЭ

№	Наименование характеристики	До испытаний	После испытания
1	Напряжение холостого хода, В	1,597±0,013	1,545±0,021
2	Плотность тока короткого замыкания, мА/см^2	4,75±0,18	2,67±0,45
3	Напряжение при P=Pmax, В	1,247±0,035	0,927±0,195
4	Плотность тока при P=Pmax, мА/см^2	3,41±0,23	1,63±0,52
5	Максимальная удельная мощность (Pmax), Вт/м^2	42±2	18±1

Таблица 2

Коэффициенты деградации электрических характеристик СЭ

№	Наименование характеристики	Значение коэф. деградации
1	Плотность тока короткого замыкания	0,56±0,08
2	Напряжение холостого хода	0,97±0,01
3	Плотность тока в точке максимальной мощности	0,48±0,09
4	Напряжение в точке максимальной мощности	0,75+0,03
5	Максимальная удельная мощность	0,43±0,09

Анализ данных табл. 1 и 2 позволяет сделать следующие основные выводы:

при повреждении ячейки, входящей в сборку, в случае если не повреждены проводники всей сборки, напряжение холостого хода, обеспечиваемое этой сборкой, уменьшается незначительно;

значение силы тока короткого замыкания существенно уменьшается при повреждении ячейки испытываемой сборки, так в среднем, при повреждении одной ячейки ток короткого замыкания уменьшается более чем на 40%;

отмечается существенное снижение максимальной мощности, обеспечиваемой сборкой, после повреждения одной из ее ячеек, превышающее 50%.

Таким образом, с учетом результатов как данного исследования, так и результатов, полученных в других работах [1], следует заключить, что в случае повреждения незначительной части элементов, составляющих СБ большой площади, энергетические параметры такой СБ изменятся незначительно. Однако для случая повреждения солнечных элементов малоразмерных СБ, например, используемых в КА типа CubSat, вызванное таким повреждением существенное (более 50%) снижение мощности, обеспечиваемой СБ, может значительно сократить время активного существования такого КА.

Список литературы

1. Зернов А.С., Николаев В.Д. Опыт эксплуатации солнечных батарей служебного модуля международной космической станции // Труды МАИ. Космическая техника и технологии, 2016. Вып. 1 (12). С. 29–38.

2. Новиков Л.С., Надирадзе А.Б., Бедняков С.А., Гаврюшин А.В. Шунтирование элементов солнечных батарей при одиночных ударах твердых частиц // Труды МАИ. Космическая техника и технологии, 2000. Вып. 1. С. 45–56.

3. Гончаров П.С., Житный М.В. Методика подготовки данных для экспериментальных исследований взаимодействия высокоскоростных частиц с элементами конструкции космического аппарата // Известия Тульского государственного университета, 2017. Вып. 11. Ч. 3. С. 68–75.

4. CubeSat Design Specification Rev.13 The CubeSat Program [Электронный ресурс] // Cubesat.org: Сервер Калифорнийского государственного университета, 2020. URL: https://static1.squarespace.com/static/ 5418c 831 e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf (дата обращения: 15.04.2020).

5. Назаренко А.И. Моделирование космического мусора // Механика, управление и автоматика. М.: ИКИ РАН, 2013. 216 с.

6. Синельников Э.Г. [и др.]. Методика определения скорости сквозного пробития мишенной обстановки // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. СПб., 2016. № 652. С. 34 – 41.

7. ГОСТ Р МЭК 60904-1-2013. Приборы фотоэлектрические. Измерение вольтамперных характеристик. Часть 1. Дата введения 2015-01-01.

8. ГОСТ Р 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. Дата введения 2011-12-13. М.: Стандартинформ. 2013. 19с.

Гончаров Павел Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, начальник отдела, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Житный Михаил Владимирович, канд. технических наук, доцент, старший научный сотрудник, mikelen2@rambler.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Копейка Александр Леонидович, научный сотрудник, koppya252@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Синельников Эдуард Геннадьевич, старший научный сотрудник, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Денисов Андрей Михайлович, кандидат технических наук, доцент, докторант, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

RESULTS MODELING THE SHOCK INFLUENCE OF SMALL PARTICLES ON SOLAR ELEMENTS OF A SPACE VEHICLE

P.S. Goncharov, M.V. Zhitnyy, A.L. Kopeyka, E.G. Sinelnikov, A.M. Denisov

The article presents the results of experimental studies of the impact of impactors simulating small-sized solid particles of space debris on the electrical characteristics of solar cells for space purposes. The laboratory base used and the measurement procedure are described. Typical solar cell damage resulting from the kinetic effects of small solid particles is shown. The degradation coefficients of the electrical characteristics of solar cells are given.

Key words: space debris, solar cell, solar battery, spacecraft.

Goncharov Pavel Sergeevich, candidate of technical science, head of department, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Zhitnyy Mihail Vladimirovich, candidate of technical science, docent, senior researcher, mikelen2@rambler.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Kopeyka Alexander Leonidovich, researcher, koppya252@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Sinelnikov Eduard Gennadievich, senior researcher, vka@mil.ru, Russia, St. Petersburg, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Denisov Andrei Mikhailovich, candidate of technical science, docent, doctoral candidate, vka@mil.ru, Russia, St. Petersburg, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy

УДК 004.056

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

С.Ю. Борзенкова, Е.Е. Казарина

В статье рассматривается проблема оценки защищенности информационных систем. Проведен анализ математических методов, дающие на выходе количественные показатели с целью выявления применимости методов для оценки реального уровня защищенности с точки зрения удобства их использования, взаимосвязи с используемыми механизмами защиты и гибкостью к постоянно изменяющимся угрозам безопасности.

Ключевые слова: оценка уровня защищенности, информационная безопасность, угрозы, уязвимости, критерии, методы.

Исследование проблем оценки реального уровня защищенности критически важных информационных систем (далее - ИС) в процессе их эксплуатации является одним из приоритетных направлений в развитии информационной безопасности. Оценка реального уровня защищенности ИС является основой построения всей системы защиты информации для каждой конкретной организации, а также определяет вектор развития уже существующей системы защиты, акцентируя её уязвимые стороны.

Под защищенностью понимается состояние информации, при котором становится невозможным или затруднено воздействия случайного или преднамеренного характера, влияющие на конфиденциальность, целостность и доступность информационных активов и инфраструктуры организации. В целях достижения такого состояния применяются различные меры и средства по защите информации в ИС. Для того, чтобы определить насколько эффективными являются предпринятые меры и средства необходимо постоянно проводить оценку защищенности ИС. Кроме оценки эффективности принимаемых мер оценка уровня защищенности необходима:

для решения задачи создания механизма заблаговременного обнаружения и раннего предупреждения угроз безопасности;

для оценки соответствия требованиям по защите информации. Под оценкой соответствия требованиям понимается прямое или косвенное определение степени соблюдения требований по защите информации, предъявляемых к ИС;

для оценки риска нарушения информационной безопасности.

Проблема оценки защищенности ИС прежде всего связана со сложностью определения качественных и количественных показателей применяемых мер.

Понятие защищенности связаны с возможностью или невозможностью реализации угроз информационной безопасности организации: В нормативных документах угроза - совокупность факторов и условий, создающих опасность нарушения информационной безопасности организации, вызывающую или способную вызвать негативные последствия (ущерб/вред) для организации.

Формой реализации (проявления) угрозы ИБ является наступление одного или нескольких взаимосвязанных событий ИБ и инцидентов ИБ, приводящих к нарушению свойств информационной безопасности (конфиденциальность, целостность, доступность) объектов защиты организации.

Условием реализации угрозы безопасности, обрабатываемой в системе информации, может быть недостаток или слабое место в информационной системе Угроза характеризуется наличием уязвимостей. Уязвимость информационной системы - свойство информационной системы, обусловливающее возможность реализации угроз безопасности обрабатываемой в ней информации. Необходимо своевременно предпринимать действия по обнаружению и устранению уязвимостей ИС на всех уровнях защиты информации. Если уязвимость соответствует угрозе, то существует риск нарушения информационной безопасности.

Методы, которые могут применяться для оценки уровня защищенности, реализуют как качественные, так и количественные подходы к оценке защищенности ИС. Применение количественных и/или качественных методов зависит от конкретной ситуации, доступности достоверных данных и потребностей организации, связанных с принятием решений по защите информации.

Особенно актуальна задача оценки уровня защищенности ИС на этапе эксплуатации ИС. На этапе эксплуатации количественные методы реализуются на основе получения соответствующих данных о текущей конфигурации и реализуемой политике безопасности. Качественные требуют привлечения экспертных решений. В случае применения качественных методов требуется разработки определенного набора показателей и критериев, позволяющих с достаточной степенью достоверности оценить реальный уровень текущего состояния безопасности ИС.

В настоящей статье рассмотрены наиболее популярные математические методы оценки уровня защищенности ИС, дающие на выходе количественные показатели защищенности. Целью сравнения стало выявление сильных и слабых сторон существующих методов, с точки зрения удобства их использования, взаимосвязи с используемыми механизмами защиты и гибкостью к постоянно изменяющимся угрозам безопасности.

Результаты анализа методов оценки уровня защищенности, которые могут быть использованы, приведены в таблице.

Методы и критерии сравнения методов

Критерии сравнения	Методы			
	семантические показатели	распределение механизмов защиты	Нечеткие множества	Имитационное моделирование
Простота реализации	Простой. Реализуется комиссией; не требует специфических знаний	Простой. Реализуется комиссией; не требует специфических знаний	Сложный метод. Для расчета требуется специализированное программное обеспечение.	Сложный метод. Построение модели сложный, трудоемкий и дорогой процесс.
Состояние объекта защиты	Статическое	Статическое	Статическое	Динамическое
Рассматриваются имеющиеся в СЗИ МЗ	Да	Да	Нет	Да
Учитывается реальная загруженность МЗ по нейтрализации угроз	Нет	Частично	Нет	Да
Учитывается динамика изменения угроз	Нет	Нет	Нет	Да
Учитывается возможность адаптации СЗИ к изменению угроз	Нет	Да	Да	Да
Дает рекомендации по изменению состава МЗ и структуры СЗИ	Нет	Да	Да	Да
Учитывается ущерб от реализации угроз	Да	Нет	Да	Да
Учитывается частота реализации атак	Да	Нет	Да	Да

Окончание

Критерии сравнения	Методы			
	семантические показатели	распределение механизмов защиты	Нечеткие множества	Имитационное моделирование
Отражает взаимосвязь показателей защищенности с местоположением МЗ в структуре системы СЗИ	Нет	Да	Нет	Да
Удобство оценки точности результата	Результаты получаются с заданной точностью	Результаты получаются с заданной точностью	Результаты получаются с заданной точностью	Очень сложный процесс. Получение адекватной модели достигается довольно редко

Проанализировав все рассмотренные методы оценки защищенности наглядно видно, что основной проблемы существующих методов, является статичность входных данных и отсутствие гибкости в рамках отражения вновь появляющихся угроз. Таким образом, владельцам ИС необходимо регулярно проводить контроль и переоценку текущего уровня защищенности. Особо нужно отметить, что для получения максимально достоверной картины, отражающей реальное положение вещей, разумно использовать сразу несколько методов оценки.

По результатам анализа можно сделать вывод, что наибольшую перспективу развития имеет метод имитационного моделирования. Благодаря своему большому математическому аппарату он позволяют моделировать различные состояния системы защиты и рассчитать предельные нагрузки на механизмы защиты во время различного рода атак. Однако этот метод является самым трудоемким и как следствие самым дорогим в реализации, а точность полученных результатов не всегда поддается оценке.

Выбор метода оценки защищенности будет зависеть от возможностей организации и целей защиты информации. Для выбора в этом случае можно использовать методы экспертных оценок.

Результатом проведения оценки реального уровня защищенности будет информация, которая является основой для принятия решения по обеспечению заданного уровня безопасности информации.

Список литературы

1. Полянский Д.А. Оценка защищенности: учебное пособие // Комплексная защита объектов информатизации. Владимир: Изд-во Владимирского государственного университета, 2005. Кн. 10. 80 с

2. Асаи К., Ватада Д., Иваи С. и др. Прикладные нечеткие системы. М.: Мир, 1993. 368 с.

3. Имитационное моделирование: учебник и практикум для академического бакалавриата. М.: Издательство Юрайт, 2014. 389 с.

4. ТЕХЭКСПЕРТ // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. [Электронный ресурс] URL: http://docs.cntd.ru/ (дата обращения: 03.05.2020).

5. Суханов, А.В. Оценки защищенности информационных систем // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов: сетевой журнал. [Электронный ресурс] URL: http://jurnal.org/articles/2008/inf33.html#_Toc45687705. (дата обращения: 04.05.2020).

6. Толстых О.В., Обухова Л.А., Применение методов нечеткой математики для оценки параметров защищенности объекта информатизации // Научная электронная: сетевая библиотека. [Электронный ресурс] URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=27357927 (дата обращения: 04.05.2020).

7. Толстых О.В., Обухова Л.А. Применение методов нечеткой математики для оценки параметров защищенности объекта информатизации // Научная электронная: сетевая библиотека. [Электронный ресурс] URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=27357927 (дата обращения: 05.05.2020).

Борзенкова Светлана Юрьевна, канд. техн. наук, доцент, tehnol@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Казарина Екатерина Евгеньевна, студентка, ee.kazarina@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYSIS OF METHODS OF ASSESSING THE LEVEL OF SECURITY OF INFORMATION SYSTEMS DURING THEIR OPERATION

S.Yu. Borzenkova, E.E. Kazarina

The article discusses the problem of assessing the security of information systems. An analysis of mathematical methods was carried out, with quantitative outputs, to determine the applicability of methods to assess the real level of security in terms of ease of use, the relationship with the security mechanisms used and the flexibility to constantly changing security threats.

Key words: security assessment, information security, threats, vulnerabilities, criteria, methods.

Borzenkova Svetlana Yurievna, candidate of technical sciences, docent, tehnol@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kazarina Ekaterina Evgenievna, student, ee.kazarina@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.056

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В БАНКОВСКОЙ СИСТЕМЕ

Е.Д. Босова, В.А. Селищев

Рассмотрены основные способы защиты информации, обрабатываемой в банковских организациях.

Ключевые слова: информация, угрозы информации, защита информации, искусственный интеллект.

В настоящее время вопросы, связанные с защитой информации, актуальны, так как почти любая организация стремится создать все необходимые условия для обеспечения безопасности при хранении, обработке и передаче информации об этом предприятии. Особенно важным является создание информационной безопасности в банковской системе, ибо она играет ведущую роль как в жизни государства, так и в жизни каждого человека.

Для обеспечения защиты информации необходимо правильно оценить риски и в соответствии с этим разработать подходящую систему защиты информации [1]. Под обеспечением информационной безопасности в банках понимают системный процесс, при котором необходимо разработать определенный комплекс мероприятий, который будет способствовать уменьшению возникновения того или иного риска в будущем и минимизации потерь. В связи с ростом количества услуг, предоставляемых банком, требуется наличие единых национальных стандартов оценки уровня защищенности банка, так как только таким образом появляется возможность обеспечить в банковской системе необходимый уровень защищенности.

Таким стандартом является стандарт Банка России «Обеспечение информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации. Общие положения», в котором представлены требования международных стандартов к банковским системам России в сфере защиты информации.

Данный стандарт включает в себя 5 этапов:

1) формирование политики информационной безопасности;

2) определение области действия системы обеспечения информационной безопасностью;

3) оценка и обработка рисков информационной безопасности;

4) управление информационной безопасностью;

5) контроль достижения целей политики информационной безопасности.

На первом этапе происходит разработка положений, регламентов и инструкций для каждой области деятельности банка, основанных на целях, задачах и требованиях политики информационной безопасности.

На втором этапе готовятся документы и инструкции, в которых отражаются информационная система и перечень ее ресурсов, подлежащие защите. Данная документация составляется исходя из особенностей структуры организации, технологий обработки данных, автоматизированных систем, информационных ресурсов и типа программного обеспечения.

На третьем этапе составляется документация, в которой описываются угрозы и уязвимости, которые могут возникнуть в результате негативного воздействия на информационную систему банка. Также появляется возможность подобрать средства, которые смогут обеспечить необходимый уровень защищенности предприятия. Для оценки рисков используется определенный алгоритм, состоящий из 4 этапов: 1 – идентификация и количественная оценка информационных ресурсов, необходимых для работы банка; 2 – оценка возможных угроз и расчет вероятности наступления риска; 3 – выявление уже имеющихся уязвимостей; 4 – определение уровня допустимого риска.

На четвертом этапе разрабатывается комплекс мер по обеспечению информационной безопасности, который включает в себя стандарты и требования по функционированию службы безопасности, занимающейся обнаружением и реагированием на различные уязвимости в системе [2].

На пятом этапе осуществляется проверка требований по обеспечению защиты информации с помощью проведения аудита информационной безопасности.

Общедоступность данных демонстрирует вероятность осуществления пользователями данных собственных прав доступа. Целостность данных демонстрирует их неизменность при различных взаимодействиях с ними, такими, как передача, обработка и хранение. Конфиденциальность информации включает в себя запрет ее разглашения третьим лицам без согласия обеих сторон.

Так, в Сбербанке была введена система искусственного интеллекта для мобильного приложения «Сбербанк Онлайн», которая анализирует и выводит на главный экран приложения наиболее часто используемые действия пользователя. Искусственный интеллект выделяет самые активные карты и также отображает их на главном экране. Что касается офлайн работы банка, то система искусственного интеллекта здесь введена для сокращения времени на обслуживание клиентов. Однако наряду с улучшением работы банка возникает необходимость в разработке дополнительных средств защиты информации, так как появляются новые угрозы, связанные с утечкой информации, возникающие при работе самого искусственного интеллекта.

В банке ВТБ искусственный интеллект отвечает за сканирование информационной системы, выявление возможных каналов утечки информации, предупреждение потенциально возможных угроз и отказав оборудования. Он позволяет уменьшить затраты на обеспечение защиты информации в системе, избежать случайных ошибок персонала при работе с данными, однако эта система нуждается в постоянном обновлении и совершенствовании во избежание утечки информации.

В Газпромбанке искусственный интеллект используется для обработки заявок на кредит. Система может распознавать данные российских паспортов и справки 2-НДФЛ вне зависимости от обеспечения. Данная функция позволяет сократить время на обслуживание клиентов. Однако эта система нуждается в мощной защите, так как обрабатывает персональные данные граждан РФ, поэтому банку помимо затрат на установку придется достаточно много средств потратить на обеспечение бесперебойной и безопасной работы данной функции.

Если же сравнить системы искусственного интеллекта в трех ведущих банках РФ, то вероятнее всего в ВТБ более полезная и менее затратная. Однако каждая система искусственного интеллекта имеет свои плюсы и минусы, и можно предположить, что в комплексе эти системы смогли бы как сократить время работы с клиентами, так и сделать информационную среду предприятия более безопасной.

В настоящее время главным фактором успеха в банковских системах является качество предоставляемых услуг, за которое отвечает информационная безопасность. При низком качестве услуг у банка могут возникнуть операционные, финансовые и репутационные риски. Не следует также забывать про взаимодействие между клиентом и банком, которое должно быть комфортным, безопасным и, самое главное, доступным по цене.

Создание информационной безопасности в банковской системе должно соответствовать уровню организационного и технического развития банка. Необходимым минимумом для непрерывной работы бизнеса является обеспечение конфиденциальности, целостности и доступности информации. Реализация политики безопасности и поддержание ее на соответствующем уровне осуществляются с помощью модели Деминга. Данная модель лежит в основе таких стандартов качества, как: ГОСТ Р ИСО 9001 и ИБ ISO/IEC IS 27001-2005. В данных стандартах модель зрелости основывается на стандарте Cobit 5, который включает в себя следующие уровни зрелости процессов [3].

Нулевой уровень (неполный процесс) – данный процесс пока что отсутствует в организации или же даже частично не соответствует своему назначению, деятельность организации не включает в себя меры по управлению информационной безопасностью. Отсутствует служба информационной безопасности и организационные меры по поддержанию достаточного уровня безопасности системы.

Первый уровень (осуществленный процесс) – процесс присутствует в организации и соответствует своему назначению, однако не соответствует стандартам в области ИБ. В организациях для обеспечения безопасности используется комплекс организационных и технических мер.

Второй уровень (управляемый процесс) – отвечает за управление предыдущем уровнем, то есть позволяет контролировать, отслеживать и планировать процесс с первого уровня. В организации присутствуют

утвержденные концепция и политика безопасности, должностные инструкции, планы защиты и прочая документация в сфере защиты информации.

Третий уровень (установленный процесс) – управляемый процесс уже стандартизирован, документально подтвержден и персонал осведомлен о его присутствии в организации. Присутствуют методики анализа рисков информационной безопасности, соответствующие минимальному уровню защиты информации. Также есть служба информационной безопасности, в которой определен состав и структура.

Четвертый уровень (предсказуемый процесс) – ведется постоянное совершенствование процессов управления информационной безопасности, а действия направлены на развитие методов, реагирующих на атаки и предотвращающих их.

Пятый уровень (оптимизируемый процесс) – используется комплекс защитных мер, а сама организация способна быстро адаптироваться под различные изменения в бизнес-сфере.

В заключение необходимо сказать, что модель зрелости используется лишь в зарубежных организациях, примером этого могут служить стандарты из серии ISO 27000, регулирующей вопросы по управлению ИБ. На основе данной модели в организациях проводится оценка уровня зрелости процессов, которая помогает ответить на ряд вопросов по обеспечению безопасности. Можно предположить, что после внедрения данной модели в банковские системы станет проще оценить их уровень безопасности, что выгодно как для самой организации, так и для клиентов, которые смогут выбрать наиболее безопасный банк.

Список литературы

1. Марданов Р.Х., Ильин И.В. Стандарты информационной безопасности в банковской системе // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2013. Т. 17. № 7. С. 55 – 60.

2. Ревенков П.В. Управление рисками в условиях электронного банкинга. М.: ИД «Экономическая газета», 2011. 168 с.

3. Сердюк В. Роль стандартов Банка России в обеспечении информационной безопасности кредитно-финансовых организаций // Бухгалтерия и банки. 2008. № 3. [Электронный ресурс] URL: https://www.dialognauka.ru/press-center/article/7519/?y=2008&m=07 (дата обращения: 10.02.2020).

Босова Екатерина Дмитриевна, студент, bosova19091999@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Селищев Валерий Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, sel648val@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ENSURING INFORMATION SECURITY IN THE BANKING SYSTEM

E.D. Bosova, V.A. Selishev

The main methods of protecting information processed in banking organizations are considered.

Key words: information, threats to information, information protection, artificial intelligence.

Bosova Ekaterina Dmitrievna, student, bosova19091999@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Selishev Valeryi Anatolievich, candidate of technical sciences, docent, sel648val@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.317

АНАЛИЗ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧ

О.А. Губская, М.Н. Плут, О.Р. Спиридонов, Е.В. Фатьянова

В статье дан анализ внешних факторов, влияющих на работоспособность волоконно-оптические системы передач, подробно рассмотрены их негативное воздействие на параметры оптического волокна кабеля.

Ключевые слова: волоконно-оптические системы передач, оптический кабель, оптическое волокно, поверхностное сопротивление, электротермическая деградация, электромагнитное поле, удельное сопротивление поверхности оболочки оптического кабеля, напряжение, микродуги, микроразряды, макроизгибы, микроизгибы, напряжение коронирования, арамидные нити, электродвижущая сила, ток, пробои изоляционных покрытий.

На современном этапе развития сетей связи переход на цифровые волоконно-оптические системы передач (ВОСП) вполне понятен, так как ВОСП имеют ряд неоспоримых преимуществ. К ним относятся: широкая полоса пропускания, малое затухание светового сигнала в волокне, низкий уровень шумов, высокая помехозащищенность и др. Однако специфика применения ВОСП заключается не только в особенностях распространения информационного сигнала, но и в конструкции самого оптического волокна (ОВ), его критичности к различного рода внешним воздействиям и нагрузкам. Оптическое волокно подвержено влиянию механических воздействий, влаги, температуры, радиации, внешних электромагнитных влияний, электротермической деградации (ЭТД). Все это приводит к увеличению затухания сигнала, а кроме того на поверхности ОВ появляются микротрещины и происходит частичное или полное его разрушение.

Эти факторы могут воздействовать на оптический кабель (ОК) и волокно как отдельно друг от друга, так и совместно, например, радиация и высокие температуры, низкие температуры и вода, высокие температуры и электромагнитные влияния.

Основной задачей ОК является передача оптического сигнала. За осуществление данной функции в ОК отвечает ОВ. Все остальные элементы ОК лишь помогают ее выполнять, защищая ОВ от различных воздействий.

Поэтому ОК снаружи должны иметь соответствующие покрытия и оболочки, защищающие его от радиации, воды и других атмосферно-климатических воздействий.

На рисунке представлена совокупность внешних факторов, влияющих на параметры ОВ.



Внешние факторы, влияющие на параметры ОВ

Рассмотрим кратко воздействие основных внешних факторов на ОВ ОК.

Механические влияния проявляются как результат работы сил, следствием которого является разрыв ОВ или возникновение в нём трещин. Такие воздействия могут длиться как кратковременно, так и достаточно долго.

Изгибы подразделяются на макроизгибы и микроизгибы. В первом случае изгибы ОВ появляются в процессе скрутки их по длине кабеля и намотки на барабан, а во втором случае, как правило, - в процессе их изготовления. Однако эти разновидности изгибов достаточно опасны, так как приводят к росту потерь мощности в ОВ, а в худшем случае могут привести к его разрыву.

Потери на макроизгибах ОВ обусловлены вытеканием или излучением направляемых мод и становятся недопустимо большими при уменьшении радиуса кривизны изгиба до критических значений.

Микроизгибы также приводят к потере мощности излучения, они возникают в процессе изготовления кабеля, наблюдаются по всей длине ОВ и носят случайный характер.

Макроизгибы при малом радиусе могут провоцировать множество микроизгибов в ОВ.

Растягивающие воздействия наблюдаются при эксплуатации в сетях связи, хранении, а также при строительстве. Такое воздействие имеет разный характер в зависимости от расположения ОВ, например, при хранении на катушке нагрузка на кабель будет статической, а при подвесе на опорах – динамической.

Скручивание ОВ возникает в процессе изготовления кабеля или при его прокладке.

Раздавливающая нагрузка возникает в процессе эксплуатации линий связи, особенно в сетях, где кабель проложен в грунте либо под водой. Так же стоит учесть и давление на ОВ, создаваемое остальными составляющими кабеля.

Механические вибрации воздействуют на ОК, подвешенный на опорах контактной сети, при прохождении подвижного состава.

Электромагнитные поля (ЭМП) оказывают влияние как на подвесные ОК, так и на кабели, проложенные в земле, независимо от того диэлектрические это кабели или содержат металлические элементы.

Основные типы электромагнитных влияний:

грозовые разряды;

воздействие высоковольтных линий электропередач и железных дорог.

Подземные волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), как элементы ВОСП, также, как и воздушные, подвергаются разрушениям при попадании токов молнии в землю вблизи места их прокладки или при попадании токов молнии в ВОСП.

Эти напряжения и токи могут быть опасны для изоляции жил ОК и для включённой аппаратуры. При прожоге и пробое изоляции между жилами и оболочкой кабеля часть тока молнии попадает и в жилы кабеля. В этом случае напряжение на жиле кабеля по отношению к оболочке, в месте удара молнии, становится равным нулю, а в местах, отдалённых от места удара молнии, возрастает до опасных величин.

Величина токов в жилах в месте удара молнии максимальна и постепенно уменьшается по мере удаления от этого места.

Если ОК является полностью диэлектрическим, то при ударе молнии вблизи самого кабеля он не повреждается. Однако световая волна, передаваемая по ОК под действием внешнего ЭМП молнии, может испытать поворот плоскости поляризации, что приводит к увеличению поляризационной модовой дисперсии (ПМД).

Влияние грозовых разрядов на ОК с металлическими составляющими заключается в следующем: часть тока молнии, ударившей близ ВОСП, попадает в металлические составляющие, тем самым повреждая оболочки и другие части конструкции. При протекании тока молнии по металлической оболочке может происходить пробой внешнего шланга или изолирующих материалов между металлическими составляющими кабеля, что приводит к попаданию воды и повреждению ОВ.

Что касается подвесных кабелей, то в их металлических элементах возможно наведение электродвижущей силы, токов, а значит, вероятны пробои изоляционных покрытий.

Разрушение ОВ возможно в том случае, если оно находится на пути искрового пробоя или близко от него.

В случае если кабель подвешен на высоковольтных линиях электропередачи или на опорах железных дорог, то можно говорить об ЭТД, то есть о разрушении оболочки ОК из-за протекания токов по загрязнённой поверхности оболочки (независимо от наличия металлических составляю-

щих в кабеле). Последствием становится проникновение воды, а значит, появляется возможность её скапливания, что приводит к усилению давления на ОВ, вызывает увеличение затухания.

Наиболее яркие последствия таких влияний характерны для подвесных кабелей, так как в воздухе перепад температур обычно гораздо больше, чем в почве или воде.

Положительные и отрицательные температуры вызывают соответственно расширение и сжатие ОВ и других составляющих ОК, что приводит к возникновению механических напряжений в ОВ. Такого рода напряжения приводят к росту трещин в волокне, а это провоцирует увеличение коэффициента затухания.

Воздействия положительных и отрицательных температур одинаково опасны. Так при нахождении ОК в условиях повышенных температур происходит размягчение оболочек, у арамидных нитей наблюдается снижение разрывной прочности.

Всё это приводит к увеличению нагрузки непосредственно на ОВ, то есть к его сдавливанию, а значит, влечёт за собой рост коэффициента затухания.

Влияние низких температур так же приводит к разрушению составляющих кабеля, провоцирует трещины, а значит увеличение потерь мощности.

Следует отметить, что совместное воздействие различных температур и радиации приводит к значительному увеличению потерь в ОВ.

Негативные последствия от воздействия температур обусловлены разными значениями коэффициентов сжатия и расширения материалов ОК.

Вода наносит вред ОВ и является одним из основных факторов, влияющих на его разрушение. При скапливании воды в кабеле она может вызвать долгосрочное снижение его механической прочности. Это особенно касается кабелей с плотной упаковкой волокон, в которых волокно в течение всего срока службы испытывает то удлинение, то сжатие.

Кроме того, атомы водорода, которые содержатся в молекулах воды, могут проникнуть через некоторое время (5-12 лет) в волокно, которое очень чувствительно к водороду, и вызвать его «замутнение», т.е. повышенное затухание и последующее нарушение связи. Водород, выделяющийся с течением времени, при разложении воды, является очень активным элементом и, вступая в реакцию с кислородом, входящим в структуру кварца, вызывает поглощение. Со временем этот пик захватывает и те длины волн в третьем окне прозрачности, на которых идет передача информации, что приводит к замутнению ОВ

Необходимость оценки влияний радиации на ОВ связана с тем, что в последние время ВОЛС стали чаще применяться в зонах радиоактивного излучения: атомные электростанции, технологические лини по переработке ядерных отходов. Под действием ионизирующего излучения ОВ могут терять свою пропускную способность.

Основная причина роста потерь заключается в возникновении центров окраски (ЦО) в световедущей сердцевине или в светоотражающей оболочке, по которой в одномодовых ОВ распространяется значительная часть света.

Центры окраски возникают в результате комбинации электронов проводимости с дырками и вакансиями, появившимися на дефектах кристаллической решётки, образовавшихся в результате воздействия радиации. Такие центры окраски поглощают свет в некоторых частях спектра, а значит, приводят к дополнительным потерям мощности.

Стоит отметить, что радиационное воздействие может появляться при ударах молнии, особенно в горах и близ высоких зданий. Электротермическая деградация ОК выражается так же в разрушении поддерживающих зажимов и конструктивных элементов в месте наложения зажимов, в появлении вздутий оболочки в пролётах между опорами.

Основными факторами, вызывающими ЭТД являются:

емкостные токи утечки, возникающие на загрязненной поверхности ОК под действием переменных ЭМП, создаваемых контактной сетью и другими высоковольтными проводами, подвешенными на опорах контактной сети;

токи утечки контактной сети, питающих и усиливающих проводов переменного тока, связанные с повышенным сопротивлением заземлений и с загрязнением изоляторов;

воздействие ЭМП, вызывающее поляризационные процессы в диэлектрических элементах ОК, сопровождающиеся выделением тепла.

Таким образом, изложенные в статье факторы, влияющие на работоспособность составных элементов ВОСП, в частности ОВ ОК, позволяют в полном объеме учитывать их негативное воздействие на ВОСП при строительстве и предусмотреть проведение как организационных, так и технических мероприятий по повышению надежности ВОСП в ходе эксплуатации.

Список литературы

1. Осипов В.А., Соловьев Г.Е., Гороховский Е.В., Капкаев А.А. Проблемы электротермической деградации волоконно-оптических линий связи и перспективное направление их решения // Инженерный вестник Дона, 2013. [Электронный ресурс] URL: http://www.ivdon.ru/ ru/ magazine/ archive/n1y2013/1539 (дата обращения: 10.02.2020).

Бочев А.С., Осипов В.А. и др. Электродинамическая деградация оптического кабеля на участке железных дорог с электротягой переменного тока. Журнал: LIGHTWAVE. 2006. №3. С. 20-24.

Губская Оксана Александровна, адъюнкт, oksanochka23932393@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Плут Михаил Николаевич, канд. техн. наук, доцент, mplout@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Спиридонов Олег Романович, студент, mplout@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича,

Фатьянова Елена Валентиновна, преподаватель, fatlen77@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного

ANALYSIS OF EXTERNAL FACTORS AFFECTING THE PERFORMANCE OF FIBER-OPTIC TRANSMISSION SYSTEMS

O.A. Gubskaya, M.N. Plut, O.P. Spiridonov, E.V. Fatianova

The article analyzes the external factors that affect the performance of fiber-optic transmission systems, and discusses in detail their negative impact on the parameters of optical fiber cable.

Key words: fiber-optic transmission systems, optical cable, optical fiber, surface resistance, electrothermal degradation, electromagnetic field, resistivity of the optical cable shell surface, voltage, micro-arcs, micro-discharges, macro-bends, micro-bends, corona voltage, aramid filaments, electromotive force, current, breakdown of insulation coatings.

Gubskaya Oksana Aleksandrovna, postgraduate, oksanochka23932393@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of telecommunications named after Marshal Of The Soviet Union S.M. Budyonny,

Plut Mikhail Nikolaevich, candidate of technical Sciences, docent, mplout@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of telecommunications named after Marshal Of The Soviet Union S.M. Budyonny,

Spiridonov Oleg Romanovich, student, mplout@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of telecommunications named after Professor M.A. Bonch-Bruevich,

Fatyanova Elena Valentinovna, teacher, fatlen77@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of telecommunications named after Marshal Of The Soviet Union S.M. Budyonny

УДК 621.396

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ФИЛЬТРА ПРИ ПРИЁМЕ ИНФОРМАЦИИ ПО ДВУХЛУЧЕВЫМ КАНАЛАМ СВЯЗИ

О.Н. Акиншин, А.И. Полубехин, Д.В. Ёркин, Д.Б. Карандин, К.В. Косов

Разработан алгоритм работы поляризационного фильтра, содержащего последовательность действий, необходимых для определения его эффективности. Проведена оценка помехоустойчивости приема информации, передаваемой по двухлучевым каналам связи, оснащенными в пункте приема двух- и трехэлементными поляризационными фильтрами.

Ключевые слова: поляризационный фильтр, канал связи, электромагнитное поле, помехоустойчивость.

Задачей исследований работы поляризационных фильтров является анализ эффективности разделения смеси двух волн на парциальные составляющие применяемыми алгоритмами, а также оценка помехоустойчивости приема информации, передаваемой по двухлучевым каналам связи, оснащенными в пункте приема двух- и трехэлементными поляризационными фильтрами [1-3]. Определенный интерес представляет обеспечение раздельного приема парциальных составляющих двухлучевого поля и оценка снижения уровня флуктуаций амплитуды смеси двух квазикогерентных волн за счет подавления одной составляющей этой смеси в одном из каналов фильтра.

Принципиальная блок-схема используемого алгоритма представлена на рис.1. На двух параллельных входах системы синфазного сложения рассматриваются отсчеты сигналов $U_1(t)$ и $U_2(t)$, взятые в один момент времени t_0.

Далее, отсчет $U_2(t_0)$ подвергнутый предварительно операции комплексного сопряжения, перемножается с $U_1(t_0)$:

$$U_1(t_0) = a_1 e^{i[\omega_1(t_0)t_0+\varphi_1(t_0)]},\ U_2(t_0) = a_2 e^{i[\omega_2(t_0)t_0+\varphi_2(t_0)]},$$

$$U(t_0) = U_1(t_0)U_2^*(t_0) = a_1 a_2 e^{i[(\omega_1(t_0)-\omega_2(t_0))t_0+(\varphi_1(t_0)-\varphi_2(t_0))]}.$$

Комплексное число $U(t_0)$ затем нормируется путем деления на собственный модуль. В результате чего на одном из входов перемножителя 2 (рис.1) появляется комплексное число $W = e^{i[(\omega_1(t_0)-\omega_2(t_0))t_0+(\varphi_1(t_0)-\varphi_2(t_0))]}$.

В тоже время на второй вход перемножителя 2 подается задержанный на время τ_0, необходимое для вычисления коэффициента *W*, отсчет $U_2(t_0)$:

$$U_2'(t_0) = U_2(t_0)e^{i[(\omega_1(t_0)-\omega_2(t_0))t_0+(\varphi_1(t_0)-\varphi_2(t_0))]}.$$

Результат перемножения $U_2'(t_0)$ складывается на оконечном сумматоре Σ с задержанным также на время τ_0 отсчетом $U_1(t_0)$:

$$U_{ВЫХ}(t_0) = U_1(t_0) + U_2'(t_0) = (a_1 + a_2)e^{i[\omega_1(t_0)t_0 + \varphi_1(t_0)]}.$$

Энергетическая эффективность работы ПФ определяется степенью подавления одной парциальной составляющей смеси двух волн в отдельно взятом канале фильтра.

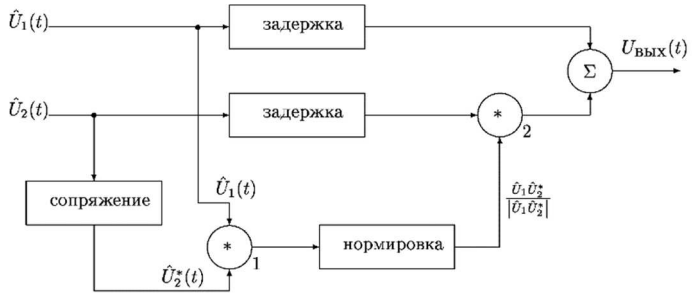


Рис. 1. Блок-схема алгоритма синфазного сложения двух квазикогерентных сигналов

Энергетическая эффективность работы ПФ определяется отношением:

$$\mu_e = \frac{\left(\frac{P_{\max}}{P_{\min}}\right)_{out}}{\left(\frac{P_{\max}}{P_{\min}}\right)_{in}}, \qquad (1)$$

где μ_e – энергетическая эффективность подавления одной волны; $P_{\min,out}$ – средняя мощность подавленной волны на выходе фильтра(условно волна E_2; $P_{\max,out}$ – средняя мощность неподавленной волны на выходе фильтра (волна E_1); $P_{\min,in}$ – средняя мощность менее интенсивной волны на входе фильтра (волна E_2); $P_{\max,in}$ – средняя мощность более интенсивной волны на входе фильтра (волна E_1).

Определение эффективности (1) условно, что становится очевидным, если принять во внимание тот факт, что амплитуды двух волн E_1 и E_2, которые поступают на вход фильтра, не равны. Поэтому, для определенности будем считать, что волна с номером 1 в среднем интенсивнее волны с номером 2.

Алгоритм работы ПФ содержит последовательность действий, необходимых для определения значения эффективности работы ПФ μ при проведении математического эксперимента с помощью ЭВМ:

1.1. В прямоугольной декартовой системе координат (x,y,z), в соответствии с моделью, задаются параметры двух частично поляризованных полей, составляющих принимаемую суперпозицию (углы прихода, состояния поляризации, степень рассеяния и деполяризации компонент);

1.2. На основе заданных параметров математическая модель формирует поток чисел $E_x(t)$, $E_y(t)$ и $E_z(t)$, представляющих собой проекции вектора двухлучевого поля с заданными параметрами на три взаимно ортогональные приемные антенны x, y и z;

1.3. Массивы чисел, описывающие проекции $E_x(t)$, $E_y(t)$ и $E_z(t)$, падающего на приемные антенны поля обрабатываются трехэлементным ПФ. В процессе адаптации ПФ ЭВМ вычисляет оптимальные значения весовых коэффициентов, обеспечивающих подавление одной характеристической волны;

1.4. В качестве входных данных модели поля задаются нулевые амплитуда детерминированной А2 и мощность рассеянной P_{s2} части поля второй волны. В этом случае ЭВМ вырабатывает потоки комплексных чисел $E_x(t)$, $E_y(t)$ и $E_z(t)$, соответствующие проекциям однолучевого поля $\vec{E}_1(t)$ на оси (*x*,*y*,*z*). Аналогичным образом получается однолучевое поле $\vec{E}_2(t)$, соответствующее волне с номером два;

1.5. В процессе работы ПФ каждая проекция векторов сформированных полей $\vec{E}_1(t)$, $\vec{E}_2(t)$ подвергается операции комплексного взвешивания с определёнными весовыми коэффициентами. Таким образом формируется отклик фильтра на каждую из волн, составляющих суперпозицию, в отдельности $U_1(t)$ и $U_2(t)$;

1.6. После использования $\vec{E}_1(t)$, $\vec{E}_2(t)$ (п. 1.4), а также откликов $U_1(t)$ и $U_2(t)$ для нахождения мощностей первой и второй волн на входе и на выходе ПФ вычисляется значение энергетической эффективности работы фильтра по формуле(1):

$$\mu_e = \frac{\max\left\{\frac{\langle U_1^2(t)\rangle}{\langle U_2^2(t)\rangle}; \frac{\langle U_2^2(t)\rangle}{\langle U_1^2(t)\rangle}\right\}}{\max\left\{\frac{\langle E_1^2(t)\rangle}{\langle E_2^2(t)\rangle}; \frac{\langle E_2^2(t)\rangle}{\langle E_1^2(t)\rangle}\right\}}.$$

Определение эффективности работы ПФ (1) дано на основе энергетических параметров принимаемых электромагнитных полей (ЭМП). Но это поле используется и для передачи информации по различным каналам связи, в частности - по ионосферному. Наряду с энергетическим определением можно рассмотреть и информационную эффективность работы ПФ:

$$\mu_i = \frac{P_{err,in}}{P_{err,out}}, \qquad (2)$$

где $P_{err,in}$ – вероятность ошибки приема информации при использовании одной линейной антенны; $P_{err,out}$ – вероятность приема информации при использовании оптимально настроенного ПФ.

Количественно помехоустойчивость оценивается вероятностью ошибки приема дискретных сообщений P_{err}. При исследовании помехоустойчивости на вход приемного устройства подается колебание на несущей частоте, модулированное по амплитуде, фазе или частоте известной последовательностью импульсов (единиц и нулей).

В случае амплитудно-модулированного сигнала в приемном устройстве задается фиксированное значение порога A_{thr}, имеющего смысл уровня шума приемника, приведенного к его выходу. В процессе исследо-

вания выходной сигнал приемного устройства сравнивается в каждый момент времени по амплитуде с указанным порогом. При превышении порога сигналу присваивается значение "единица". Если же сигнал не превысил установленный порог, то считается, что принято значение "ноль". Зная переданную последовательность импульсов, сравнивая ее как эталонную и полученную с выхода приемного устройства, оценивают вероятность ошибки приема дискретной информации. В данном случае она подсчитывается как отношение числа ошибочно принятых информационных импульсов (бит) к общему числу переданных:

$$P_{err} = \frac{n}{N}, \qquad (3)$$

где n – количество ошибочно принятых бит; N – общее количество переданных бит.

Последовательность действий, приводящих к вычислению μ_i, состоит из двух частей: часть 1 – выполнение всех действий по п.1.1-1.3; часть 2 – выполнение алгоритмов по п.2.1-2.4:

2.1. С помощью математической модели формируется двухлучевое ЭМП $\vec{E}_m(t)$. Каждая парциальная волна характеризуется заданными параметрами и при этом промодулирована по амплитуде последовательностью нулей и единиц $a_N(t)$; число сформированных бит информации равно N;

2.2. Устанавливается значение порога A_{thr}, и происходит вычисление вероятности ошибки $P_{err,in}$ по формуле (3) для одной из проекций вектора поля, не прошедшего поляризационную фильтрацию;

2.3. Модулированное двухлучевое поле $\vec{E}_m(t)$ подвергается операции комплексного взвешивания с оптимальными весовыми коэффициентами (п.1.3). Так формируется модулированный по амплитуде отклик $U_m(t)$ фильтра на поле $\vec{E}_m(t)$;

2.4. Устанавливается то же значение порога A_{thr}, что и в п.2.2, и по формуле (3) вычисляется вероятность ошибки $P_{err,out}$ для отклика фильтра $U_m(t)$ на двухлучевое поле $\vec{E}_m(t)$. Информационная эффективность работы фильтра определяется в соответствии с формулой (2).

Поиск оптимальных весовых коэффициентов поляризационного фильтра (W_1, W_2) осуществляется адаптивным способом с помощью ЭВМ. При решении этой задачи используется метод градиентного спуска, который, как известно, чувствителен к различным мешающим факторам [4,5].

При приеме радиоволн, прошедших по ионосферному каналу, в качестве таких факторов выступают, в частности, когерентный (рассеяние и деполяризация) и некогерентный (аддитивный) шум.

Необходимо исследовать с помощью математического эксперимента влияние степени рассеяния β^2, деполяризации q принимаемого поля, углов прихода θ, а также аддитивного шума на эффективность работы

двух- и трехэлементного адаптивных ПФ, использующих для поиска оптимальных весовых коэффициентов критерий минимума дисперсии мощности выходного сигнала (рис. 2).

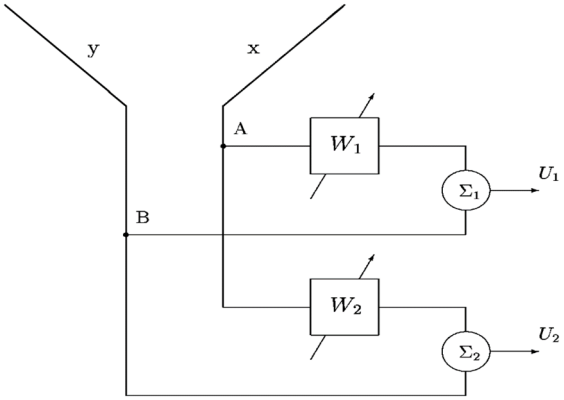


Рис. 2. Двухканальный (разделительный) поляризационный фильтр

Этот ПФ представляет собой комбинацию двух описанных фильтров, подключенных параллельно к приемным антеннам *x* и *y* в точках *A* и *B*, соответственно. Каждый канал *j* содержит блок комплексного весового коэффициента W_i и сумматор $\sum_j$, формирующий отклик U_j. Далее, в одном из фильтров устанавливается оптимальный весовой коэффициент W_o для подавления в первом канале обыкновенной волны. Одновременно с этим второй канал настраивается на подавление другой волны, необыкновенной.

Таким образом, с двух разнесенных выходов описанного ПФ будут сниматься комплексные напряженияU_1 и U_2, соответствующие отдельным составляющим падающей на фильтр смеси двух волн.

Следует отметить, что несущие частоты выходных напряжений U_1 и U_2 остаются сдвинутыми друг относительно друга на величину разности доплеровского смещения частот двух характеристических волн:

$$U_1(t) = A_1(t)e^{i(\omega_1(t)t+\varphi_1(t))},$$
$$U_2(t) = A_2(t)e^{i(\omega_2(t)t+\varphi_2(t))}, \qquad (4)$$

где ω_1, ω_2, φ_1, φ_2 – мгновенные частоты и фазы двух характеристических волн.

Оба сигнала $U_1(t)$ и $U_2(t)$ несут одинаковую полезную информацию, поэтому для наиболее эффективного ее приема необходимо сложить комплексные напряжения (4) друг с другом. Однако, чтобы избежать при этом интерференционных замираний вследствие разности несущих частот, необходимо предварительно выполнить операцию выравнивания мгновенных фаз обоих сигналов (4). Рассмотрим, не уменьшая общности, процесс приведения фазы сигнала $U_2(t)$ к фазе сигнала $U_1(t)$:

$$U_2(t) = A_2(t)e^{i(\omega_2(t)t+\varphi_2(t))} = A_2(t)e^{i(\omega_1(t)t+\varphi_1(t))}e^{i(\Delta\omega(t)t+\Delta\varphi(t))}, \qquad (5)$$

где

$$\Delta\omega(t) = \omega_2(t) - \omega_1(t), \quad \Delta\varphi(t) = \varphi_2(t) - \varphi_1(t).$$

Тогда, сигнал, равный $U_2(t)e^{i(-\Delta\omega(t)t-\Delta\varphi(t))}$ будет иметь то же значение фазы, что и сигнал $U_1(t)$. Следовательно сигнал

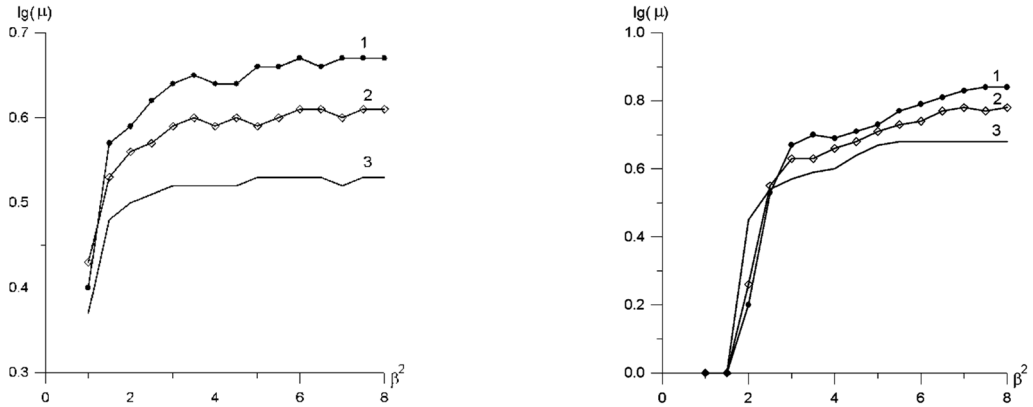
$$U_\Sigma(t) = U_1(t) + U_2(t)e^{i(-\Delta\omega(t)t-\Delta\varphi(t))} = [A_1(t) + A_2(t)]e^{i(\omega_1(t)t+\varphi_1(t))} \quad (6)$$

не будет содержать федингa, вызванного некогерентностью слагаемых сигналов.

Таким образом, становится очевидным алгоритм синфазного сложения квазикогерентных сигналов с выходов двухканального ПФ (рис. 2), используемый в настоящей работе. Он основан на измерении мгновенного значения разности фаз двух сигналов $U_1(t)$ и $U_2(t)$ (4), и на их последующем сложении, которое достигается путем умножения одного из сигналов $(U_1(t))$ на комплексный весовой коэффициент $e^{i(-\Delta\omega(t)t-\Delta\varphi(t))}$, выравнивающий фазы сигналов $U_1(t)$ и $U_2(t)$, перед их сложением.

Эта задача решалась с использованием адекватной модели частично поляризованного поля при вариациях параметров задачи β^2, q, θ и отношения сигнал/ шум (ОСШ).

На рис. 3, а, б, представлены полученные результаты в виде графиков зависимости энергетической эффективности работы ПФ (двух- и трехэлементного, соответственно) μ в логарифмическом масштабе, от степени рассеяния β^2 принимаемого двухлучевого ЭМП (исходные данные – степень деполяризации q=1; 0.96; 0.90 и ОСШ=10). Параметры β^2 и q задавались одинаковыми для каждой магнитоионной компоненты.



а ***б***

Рис. 3. Энергетическая эффективность работы двухэлементного (а) и трехэлементного (б) ПФ: β^2 – степень рассеяния каждой волны; q – степень деполяризации каждой волны; 1 – q=1; 2 – q=0.96; 3 – q=0.90. ОСШ=10

Для моделирования процессов деполяризации удобно считать, что в принимаемом поле существует колебание $\vec{\varepsilon}_d(t)$ с мощностью P_d, падающее на приемные антенны с направления, определяемого углами θ_d и φ_d, у которого проекции на разные антенны *x*, *y* и *z* взаимно не коррелированны. Наличие такой составляющей обеспечивает деполяризацию вырабатываемого моделью поля.

Общепринятые параметры β^2 и q [2,3], определяющие степень рассеяния и деполяризации электромагнитного поля, выражаются через используемые мощности детерминированной P_0, рассеянной P_s и деполяризованной P_d частей поля следующим образом:

$$\beta^2 = \frac{P_0}{P_s + P_d},$$
$$q = \frac{P_0 + P_s}{P_0 + P_s + P_d}, \qquad (7)$$

При этом легко показать, что определенные таким образом параметры β^2 и q удовлетворяют условию:

$$q \geq \frac{\beta^2}{\beta^2 + 1}.$$

Зависимость эффективности работы двухэлементного ПФ определялась при вертикальном падении поля на приемные антенны, лежащие в горизонтальной плоскости. Для трехэлементного фильтра углы падения составляли $\theta_1 = \theta_2 = 45°, \varphi_1 = \varphi_2 = 120°$. Составляющие смеси имели ортогональные друг другу состояния поляризации.

Видно, что процессы рассеяния и деполяризации, имеющие место в реальном ионосферном канале, оказывают отрицательное воздействие на эффективность работы адаптивных алгоритмов. Флуктуирующие компоненты поля (рассеянная и деполяризованная части) оказывают негативное влияние и на точность нахождения оптимальных весовых коэффициентов, и на качество подавления одной компоненты принимаемого двухлучевого ЭМП.

Из рис. 3 видно, что эффективность работы фильтра зависит от степени рассеяния падающего поля β^2. Для двухэлементного фильтра (рис. 3, а) μ с ростом β^2 повышается с 2.51 до 4.00 в линейном масштабе; для трехэлементного (рис. 3, б) – с 1.00 до 6.31.Это позволяет сделать вывод о том, что рассеяние снижает точность нахождения оптимального весового коэффициента W_1^*, который в этом случае уже не соответствует точно коэффициенту поляризации P_1 детерминированной части подавляемой волны $\vec{\varepsilon}_1(t)$.

Соответственно, взвешивание поля $\vec{\varepsilon}_1(t)$ с комплексным весом W_1^* не обеспечивает полного подавления этого поля на выходе фильтра. Влияние рассеяния на точность определения оптимальных весовых коэффициентов осуществляется, видимо, посредством дополнительного увеличения дисперсии мощности выходного сигнала фильтра. При рассмотрении суперпозиции двух детерминированных волн со смещенными спектрами дисперсия мощности выходного сигнала обусловлена только интерференционным федингом парциальных составляющих смеси. Поэтому ее минимизация при поляризационной обработке означает строгое подавление одной из составляющих смеси волн.

Важным результатом является установление зависимости эффективности работы ПФ от угла места θ смеси двух волн. Имеет место ограниченная возможность применения двухэлементного ПФ в условиях наклонного падения двухлучевого ЭМП. Действительно, при этом образуется угол θ между волновым фронтом падающей волны и плоскостью (*x*,*y*) приемных антенн. Тогда возникает проекция поля $E_z(t)$, которая не улавливается горизонтально расположенными антеннами двухэлементного ПФ. Следовательно, энергия падающего ЭМП используется не полностью, что должно вести к снижению эффективности разделения смеси двух волн на парциальные составляющие. Эти выводы подтверждаются графиками, приведенными на рис. 4. Аргументом здесь является угол θ, одинаковый для двух волн, составляющих суперпозицию.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что при изменении угла θ от 0 до 90 градусов (переход от случая вертикального падения волн к касательному поверхности Земли) эффективность работы двухэлементного фильтра снижается на 8 дБ, падая практически до 0 при $\theta \to 90°$.

Величина μ, определяемая по формуле (1), является косвенным показателем повышения качества передачи информации при использовании ПФ в приемном пункте системы связи. При увеличении отношения мощностей двух интерферирующих волн со смещенным спектром глубина провалов их суммарной амплитуды уменьшается.

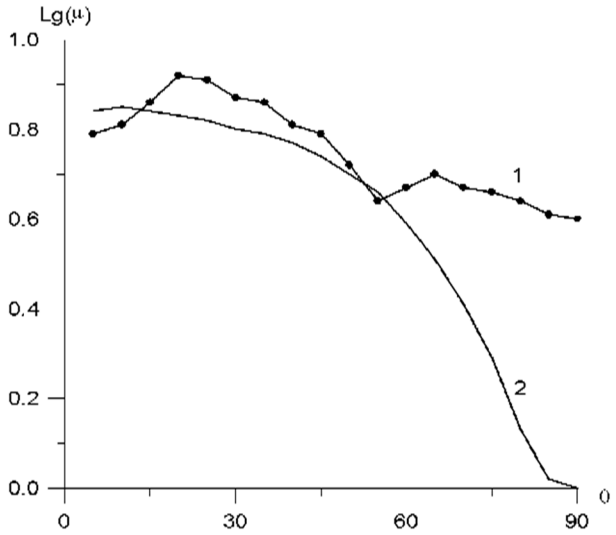
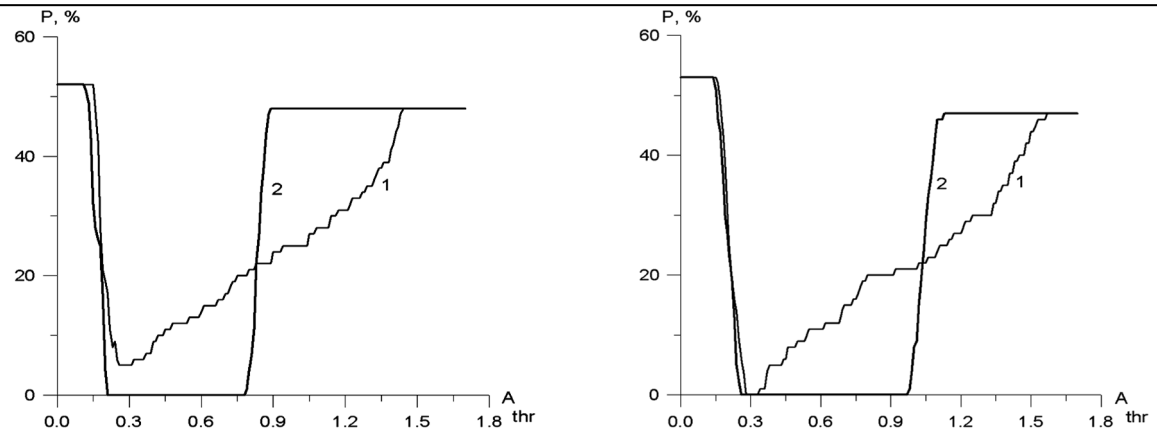


Рис. 4. Зависимость энергетической эффективности работы ПФ от угла места прихода сигнала θ: $\varphi_1 = \varphi_2 = 120°$, $\beta^2 = 10$, q=0.99, ОСШ=10; 1 – трехэлементный фильтр; 2 – двухэлементный фильтр

Следовательно, информация, передаваемая таким двухлучевым сигналом, становится менее чувствительной к уровню внутреннего шума приемного устройства.

Для количественной оценки улучшения качества связи за счет применения в пункте приема процедуры адаптивной поляризационной фильтрации вычислялась вероятность ошибки, в соответствии с формулой (3).



а ***б***

Рис. 5. Вероятность ошибки приема амплитудно-модулированного сигнала: A_{thr} - величина порога; 1 – прием на ненастроенный фильтр; 2 – прием на оптимизированный фильтр (выходной сигнал близок к однолучевому); θ - угол места суперпозиции двух модулированных по амплитуде полей; а - ПФ двухэлементный, $\theta = 10°$; г - ПФ трехэлементный, $\theta = 60°$; $\beta^2 = 18$, q=0.95; ОСШ=10, $A_1 = A_2 = 1$

На рис. 5 изображены зависимости вероятности ошибки P_{err} от уровня порога A_{thr} для случаев приема амплитудно-модулированного сигнала на двухэлементную (рис. 5, а) и трехэлементную (рис. 5, б) антенные системы. Все остальные параметры падающего на фильтры ЭМП остаются неизменными по сравнению с параметрами смеси двух волн (т.е. сигнал является двухлучевым с равными амплитудами парциальных компонент, $A_1 = A_2 = 1$).

На каждом рисунке график №1 соответствует двухлучевому сигналу, принятому без дополнительной обработки, а график №2 отвечает сигналу, прошедшему операцию оптимальной ПФ. Горизонтальные участки в начале зависимости отвечают таким значениям порога A_{thr}, при которых все точки огибающей сигнала находятся выше этого A_{thr} (рис. 5). При этом любой импульс воспринимается как логическая единица (определение P_{err}, формула (3)).

По аналогии, горизонтальный участок в конце зависимости соответствует значениям порога A_{thr}, при которых весь принимаемый сигнал оказывается ниже порога A_{thr} и воспринимается как логический нуль. Сравнивая кривые №1 и №2 на каждом из рисунков, можно убедиться в том, что применение и двух-, и трехэлементных адаптивных ПФ позволяет существенно снизить вероятность ошибки (практически до нуля) при приеме информации, передаваемой амплитудно-модулированным сигналом по двухлучевым каналам связи. Сопоставляя изменения интервала значений A_{thr}, в котором P_{err}=0, при переходе от случая падения смеси двух волн под углом места $\theta_1 = \theta_2 = 10°$ (рис. 5, а) к случаю, когда $\theta_1 = \theta_2 = 60°$ (рис. 6, б), можно сказать, что трехэлементные ПФ менее чувствительны к перемене угла места θ падения волны, чем двухэлементные.

Список литературы

1. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Сов. радио, 1970. 728 с.

2. Альперт Я.Л. Распространение радиоволн и ионосфера. М.: Наука, 1972. 564 с.

3. Поздняк С.И., Мелитицкий В.А. Введение в статистическую поляризацию радиоволн. М.: Сов. радио, 1974. 479 с.

4. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.

5. Монзинго Р.А., Миллер Р.А. Адаптивные антенные решетки. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.

6. Акиншин Н.С., Румянцев В. Л., Хомяков К.А. Адаптивные алгоритмы оптимальной фильтрации сигнала // Известия Тульского государственного университета, 2018. Вып. 9. С. 69-79.

Акиншин Николай Степанович, д-р техн. наук, профессор, начальник отдела, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тула, АО Центральное конструкторское бюро аппаратостроения,

Полубехин Александр Иванович, канд. техн. наук, преподаватель, cdbae@cdbae.ru, Россия, Москва, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

Еркин Денис Васильевич, адъюнкт, cdbae@cdbae.ru, Россия, Пенза, Пензенский артиллерийский инженерный институт имени Н.Н. Воронова,

Карандин Денис Борисович, начальник кафедры, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тюмень, Тюменское высшее военно-инженерное командное училище имени маршала инженерных войск А.И. Прошлякова,

Косов Константин Владиславович, инженер, cdbae@cdbae.ru, Россия, Анапа, ВИТ «ЭРА»

METHOD OF EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE POLARIZING FILTER WHEN RECEIVING INFORMATION VIA TWO-BEAM COMMUNICATION CHANNELS

O.N. Akinshin, A.I. Polubahin, D.V. Jerkin, D.B. Karandin, K.V. Kosov

An algorithm for the operation of a polarizing filter containing a sequence of actions necessary to determine its effectiveness has been developed. The noise immunity of receiving information transmitted via two - beam communication channels equipped with two-and three-element polarizing filters at the receiving point was evaluated.

Key words: polarizing filter, communication channel, electromagnetic field, noise immunity.

Akinshin Nikolay Stepanovich, doctor of technical sciences, professor, head of department, cdbae@cdbae.ru, Russia, Tula, JSC Central Design Bureau of Apparatus Engineering,

Polubehin Alexander Ivanovich, candidate of technical sciences, lecturer, cdbae@cdbae.ru, Russia, Moscow, Moscow State Technical University named after N.E. Bauman,

Jerkin Denis Vasilievich, adjunct, cdbae@cdbae.ru, Russia, Penza, Penza Artillery Engineering Institute named after N.N. Voronova,

Karandin Denis Borisovich, head of department, cdbae@cdbae.ru, Russia, Tyumen, Tyumen Higher Military Engineering Command School named after Marshal of Engineering Troops A.I. Proshlyakova,

Kosov Konstantin Vladislavovich, engineer, cdbae@cdbae.ru, Russia, Anapa, WIT «ERA»

УДК 621.3

ОБЗОР МЕТОДОВ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

М.Б. Богданов, А.В. Прохорцов, В.В. Савельев,
В.А. Смирнов, А.Э. Соловьев

Представлен обзор существующиъ способов комплексирования данных сбесплатформенной инерциальной навигационной системы и со спутниковой радионавигационной системы, входящих в состав инегрированных систем ориентации и навигации.

Ключевые слова: методы комплексирования, спутниковая навигационная система, фильтр Калмана, бесплатформенная инерциальная навигационная система.

По степени взаимной информационной связи гироскопического блока и блока приемной аппаратуры спутниковой навигационной системы (СРНС) различают слабосвязанные, сильносвязанные и глубокоинтегрированные интегрированные системы ориентации и навигации (ИСОН).

Наиболее просто комплексирование осуществляется в слабосвязанных системах, в которых объединение данных бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) и СРНС осуществляется на уровне вторичных навигационных параметров – координат, скоростей, параметров ориентации [4, 18]. Благодаря простоте и возможности использования стандартной приемной аппаратуры СРНС слабосвязанные ИСОН получили наибольшее распространение [8, 9, 15].

Существенным недостатком слабосвязанных систем является невозможность использования данных СРНС при числе видимых спутников меньшем четырех. Преодоление указанного ограничения возможно при наличии дополнительной информации. Так в работе [19] указывается, что если сдвиг шкалы времени приемника является постоянным, или если известна высота, то коррекция по координатам может быть осуществлена

при видимости трех спутников, если одновременно выполняются оба указанных условия, то возможно осуществление коррекции даже по двум спутникам. Дополнительная информация компенсирует недостаток данных от спутников, что позволяет приемнику вычислить координаты. Однако возможность использования дополнительной информации обеспечивается не всеми приемниками.

Более совершенными являются сильносвязанные ИСОН, в которых комплексирующий фильтр получает от СРНС первичные радионавигационные параметры – псевдодальности и псевдоскорости [11,12,18]. Комплексирование на уровне первичных радионавигационных параметров позволяет оптимальным образом использовать данные от любого количества видимых спутников [1, 3, 7, 19].

Как в слабосвязанных, так и в сильносвязанных системах в блок первичной обработки радионавигационного сигнала СРНС могут вводиться навигационные параметры с БИНС, либо их оценки, сформированные в комплексирующем фильтре ИСОН. Использование навигационных параметров для управления следящими системами приемника СРНС позволяет ускорить процесс захвата спутников и сузить их полосы пропускания, что приводит к повышению помехоустойчивости и точности [2,19].

Наиболее полно возможности ИСОН реализуются при комплексной обработке исходных сигналов БИНС и СРНС – так называемом комплексировании по входам [2]. Такие системы называют глубоко интегрированными, поскольку уровень совместной обработки сигналов БИНС и СРНС таков, что их невозможно выделить в отдельные подсистемы.

Реализация глубокоинтегрированных ИСОН достаточно сложна, поскольку требует отказа от классического построения навигационного приемника, основанного на двухэтапной обработке сигналов [2,17]. Несмотря на достаточно активные исследования в области построения сильносвязанных систем [1, 17, 20] они пока не получили практического применения в связи с высокой сложностью реализации.

В подавляющем большинстве работ, рассматривающих структуры ИСОН, для объединения данных БИНС и СРНС используются различные модификации фильтра Калмана [2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 21]. При этом как в сильносвязанных, так и в слабосвязанных ИСОН различают инвариантные и неинвариантные алгоритмы комплексирования [13,14].

В неинвариантных алгоритмах задача фильтрации решается для навигационных параметров, свойства которых, как случайных процессов, описываются с учетом уравнений динамики объекта [5]. По сравнению с инвариантными, неинвариантные алгоритмы способны обеспечить большую точность, однако они являются более сложными с вычислительной точки зрения и требуют наличия достаточно точной модели динамики объекта. Кроме того, высокая размерность вектора состояния в неинвариантных алгоритмах обуславливает медленную сходимость навигационного фильтра – переходный процесс до достижения оптимального режима рабо-

ты фильтра может составлять несколько часов [5, 6]. Указанные особенности делают данный класс алгоритмов малопригодными для высокоманевренных объектов с малым временем полета.

Наибольшее распространение получили инвариантные алгоритмы, основанные на формировании разностных измерений, в составе которых отсутствуют сами отыскиваемые параметры (параметры ориентации и навигации или псевдодальности и псевдоскорости). Т.е. в слабосвязанных системах вычисляются разности между координатами и скоростями, полученными от БИНС, и полученными от СРНС, а в сильносвязанных системах вычисляются разности между псевдодальностями и псевдоскоростями измеренными посредством СРНС и вычисленными на основании данных БИНС и данных о координатах спутников. Полученные разностные измерения подвергаются процедуре оптимальной фильтрации, в результате чего получают оценки погрешностей БИНС, а также оценки погрешностей измерения радиальной дальности и радиальной скорости СРНС. Уточненные оценки навигационных параметров получают путем коррекции показаний БИНС на величину оценок погрешностей.

Преимуществом инвариантных алгоритмов является их независимость от динамики конкретного объекта, на котором установлена ИСОН, что уменьшает риск расходимости комплексирующего фильтра из за неточной исходной информации о динамике объекта [4,5].

В сильносвязанных ИСОН с инвариантными алгоритмами обработки информации первичной задачей является формирование системы уравнений для вычисления погрешностей БИНС и СРНС. При этом погрешности БИНС могут определятся либо в прямоугольной декартовой системе координат [4], либо в геодезических параметрах [21].

Для получения такой системы уравнений в прямоугольной системе координат наибольшее распространение получил следующий подход [2,11,4].

Уравнение для псевдодальности до $i-$ого спутника можно представить в виде:

$$D_i = \sqrt{(x_{ci} - x)^2 + (y_{ci} - y)^2 + (z_{ci} - z)^2} + \delta D_i + \delta_{снс\,i}, \qquad (1)$$

где D_i - измеренное значение псевдодальности до $i-ого$ спутника; x_{ci}, y_{ci}, z_{ci} - координаты $i-ого$ спутника; x, y, z - координаты приемника; δD_i - квазипостоянная составляющая погрешности определения дальности (предполагается, что данная погрешность $\delta D_i = \delta D$, одинакова для всех спутников); $\delta_{снс\,i}$ - шумоподобная составляющая погрешности определения дальности.

Уравнение для радиальной псевдоскорости имеет вид:

$$\dot{D}_i = \frac{(x_{ci} - x)(\dot{x}_{ci} - \dot{x}) + (y_{ci} - y)(\dot{y}_{ci} - \dot{y}) + (z_{ci} - z)(\dot{z}_{ci} - \dot{z})}{D_{\text{i}}^{\text{ид}}} + \\ + \delta\dot{D}_i + \dot{\delta}_{\text{снс}i}, \qquad (2)$$

где $\dot{D}_i$ - измеренное значение псевдоскорости до $i-ого$ спутника; $\dot{x}_{ci}$, $\dot{y}_{ci}$, $\dot{z}_{ci}$ - проекции скорости $i-$ого спутника; $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ - проекции скорости приемника; $D_i^{ид}$ - истинное расстояние между спутником и приемником; $\delta\dot{D}_i$ - квазипостоянная составляющая погрешности определения радиальной скорости (предполагается, что данная погрешность $\delta\dot{D}_i = \delta\dot{D}$ одинакова для всех спутников); $\dot{\delta}_{снс\,i}$ - шумоподобная составляющая погрешности определения радиальной скорости.

При работе в составе ИСОН нелинейные уравнения (1) и (2) линеаризуются. При этом за точку линеаризации берутся данные о скоростях и координатах БИНС [2, 4, 6]. В результате линеаризации уравнение (1) принимает вид:

$$\Delta D_i = \frac{dD_i}{dx_{\text{и}}^{\text{ид}}}(x_{\text{и}}^{\text{ид}} - x_{\text{и}}) + \frac{dD_i}{dy_{\text{и}}^{\text{ид}}}(y_{\text{и}}^{\text{ид}} - x_{\text{и}}) + \\ + \frac{dD_i}{dz_{\text{и}}^{\text{ид}}}(z_{\text{и}}^{\text{ид}} - z_{\text{и}}) + \delta D_i + \delta_{\text{снс}\,i}, \tag{3}$$

где $\Delta D_i = D_i - D_{ui}$; $D_{ui} = \sqrt{(x_{ci} - x_u)^2 + (y_{ci} - y_u)^2 + (z_{ci} - z_u)^2}$ - значение псевдодальности, вычисленное на основании данных альманаха и данных БИНС; x_u, y_u, z_u - значения координат приемника, определенные по показаниям БИНС.

Значения производных определяются в точке линеаризации x_u, y_u, z_u:

$$\frac{dD_i}{dx} = \frac{-(x_{ci} - x_u)}{D_{ui}}; \ \frac{dD_i}{dy_u^{ид}} = \frac{-(y_{ci} - y_u)}{D_{ui}}; \ \frac{dD_i}{dz_u^{ид}} = \frac{-(z_{ci} - z_u)}{D_{ui}}. \tag{4}$$

Вводя для приращений обозначения $\Delta D_i = D_i - D_{ui}$, $\delta x_u = x_u - x_u^{ид}$, $\delta y_u = y_u - y_u^{ид}$, $\delta z_u = z_u - z_u^{ид}$ запишем систему линейных уравнений (3) для определения приращений координат в виде:

$$\begin{bmatrix} \delta D_1 \\ \delta D_2 \\ \dots \\ \delta D_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{dD_1}{dx_u} & -\frac{dD_1}{dy_u} & -\frac{dD_1}{dz_u} & 1 \\ -\frac{dD_2}{dx_u} & -\frac{dD_2}{dy_u} & -\frac{dD_2}{dz_u} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{dD_k}{dx_u} & -\frac{dD_k}{dy_u} & -\frac{dD_k}{dz_u} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta x_u \\ \delta y_u \\ \delta z_u \\ \delta D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{снс}1 \\ \delta_{снс}2 \\ \dots \\ \delta_{снс}k \end{bmatrix} \tag{5}$$

или, в матричной форме записи, $\delta D = H \cdot \delta x + \delta_{\text{снс}}$.

Аналогичным образом линеаризуется уравнение (2):

$$\Delta\dot{D}_i = \frac{d\dot{D}_i}{dx_{\text{и}}^{\text{ид}}}(x_{\text{и}}^{\text{ид}} - x_{\text{и}}) + \frac{d\dot{D}_i}{dy_{\text{и}}^{\text{ид}}}(y_{\text{и}}^{\text{ид}} - y_{\text{и}}) + \frac{d\dot{D}_i}{dz_{\text{и}}^{\text{ид}}}(z_{\text{и}}^{\text{ид}} - z_{\text{и}}) + \\ + \frac{d\dot{D}_i}{d\dot{x}_{\text{и}}^{\text{ид}}}(\dot{x}_{\text{и}}^{\text{ид}} - \dot{x}_{\text{и}}) + \frac{d\dot{D}_i}{d\dot{y}_{\text{и}}^{\text{ид}}}(\dot{y}_{\text{и}}^{\text{ид}} - \dot{y}_{\text{и}}) + \frac{d\dot{D}_i}{d\dot{z}_{\text{и}}^{\text{ид}}}(\dot{z}_{\text{и}}^{\text{ид}} - \dot{z}_{\text{и}}) + \delta\dot{D}_i + \dot{\delta}_{\text{снс}\,i}, \tag{6}$$

Выражения для значений производных в точке линеаризации имеют вид:

$$\frac{d\dot{D}_i}{dx_u^{ид}} = \frac{-(\dot{x}_{ci} - \dot{x}_u)}{D_{ui}}, \frac{d\dot{D}_i}{dy_u^{ид}} = \frac{-(\dot{y}_{ci} - \dot{y}_u)}{D_{ui}}, \frac{d\dot{D}_i}{dz_u^{ид}} = \frac{-(\dot{z}_{ci} - \dot{z}_u)}{D_{ui}},$$

$$\frac{d\dot{D}_i}{d\dot{x}_u^{ид}} = \frac{-(x_{ci} - x_u)}{D_{ui}}, \frac{d\dot{D}_i}{d\dot{y}_u^{ид}} = \frac{-(y_{ci} - y_u)}{D_{ui}}, \frac{d\dot{D}_i}{d\dot{z}_u^{ид}} = \frac{-(z_{ci} - z_u)}{D_{ui}}. \quad (7)$$

На основе (6) и (7) записывается система уравнений, решение которой при полном созвездии спутников позволяет определить погрешности БИНС по координатами и по скоростям, а также смещение временной шкалы приемника и смещение частоты приемника, характеризуемые погрешностями δD и $\delta\dot{D}$.

При составлении уравнений погрешностей БИНС в геодезической системе координат к уравнению (3) применяется подстановка [21]:

$$\delta x = -(N+h)\sin(\varphi)\cos(\lambda)\cdot\delta\varphi - (N+h)\cos(\varphi)\sin(\lambda)\cdot\delta\lambda + \cos(\varphi)\cos(\lambda)\cdot\delta h;$$

$$\delta y = -(N+h)\sin(\varphi)\sin(\lambda)\cdot\delta\varphi + (N+h)\cos(\varphi)\cos(\lambda)\cdot\delta\lambda + \cos(\varphi)\sin(\lambda)\cdot\delta h;$$

$$\delta z = -(N(1-e^2)+h)\cos(\varphi)\cdot\delta\varphi + \sin(\varphi)\cdot\delta h.$$

В этом случае для вычисления оценки погрешностей БИНС также получается система линейных уравнений, аналогичная (5):

$$\begin{bmatrix}\delta D_1\\ \delta D_2\\ \dots\\ \delta D_k\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{x1} & b_{y1} & b_{z1} & 1\\ b_{x2} & b_{y1} & b_{z1} & 1\\ \dots & \dots & \dots & \dots\\ b_{xk} & b_{yk} & b_{zk} & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\delta\varphi\\ \delta\lambda\\ \delta h\\ \delta D\end{bmatrix}, \quad (8)$$

где

$$b_{xi} = -\frac{dD_i}{dx_{\text{и}}^{\text{ид}}}(N+h)\sin(\varphi)\cos(\lambda) - \frac{dD_i}{dy_{\text{и}}^{\text{ид}}}(N+h)\sin(\varphi)\sin(\lambda) + \frac{dD_i}{dz_{\text{и}}^{\text{ид}}}(N(1-e^2)+h)\cos(\varphi);$$

$$b_{yi} = -\frac{dD_i}{dx_{\text{и}}^{\text{ид}}}(N+h)\cos(\varphi)\sin(\lambda) + \frac{dD_i}{dy_{\text{и}}^{\text{ид}}}(N+h)\cos(\varphi)\cos(\lambda);$$

$$b_{zi} = \frac{dD_i}{dx_u^{ид}}\cos(\varphi)\cos(\lambda) + \frac{dD_i}{dy_u^{ид}}\cos(\varphi)\sin(\lambda) + \frac{dD_i}{dz_u^{ид}}\sin(\varphi).$$

При вычислении производных в соответствии с формулами (4) необходим пересчет текущих значений геодезических координат в прямоугольные, выполняемый по известным формулам:

$$x_u = (N+h)\cos(\varphi)\cos(\lambda);$$

$$y_u = (N+h)\cos(\varphi)\sin(\lambda);$$

$$z_u = (N(1-e^2)+h)\sin(\varphi).$$

Как следует из представленных уравнений, при формировании уравнения ошибок в геодезических координатах вычисления значительно усложняются по сравнению с их формированием в прямоугольных координатах. Хотя в последнем случае необходим предварительный перевод данных БИНС в прямоугольную систему координат, общий объем вычислений оказывается существенно меньше.

Как было указано выше, в большинстве работ для комплексирования данных БИНС и СРНС используются различные варианты фильтра Калмана. В этом случае система (5) или (8) считается уравнением измерений [2, 6, 10, 12, 13]. Сами уравнения фильтра Калмана формируются на основании априорной статистической информации о характере изменения во времени погрешностей БИНС, приемной аппаратуры СРНС, и.т.п. и представляют собой дифференциальные уравнения ошибок БИНС и СРНС [6, 10, 14].

Фильтр Калмана обеспечивает вычисление оценок погрешностей БИНС при любом числе видимых спутников на основе заложенной в него статистической информации, однако следует учитывать, что фильтр Калмана является оптимальным в среднеквадратичном, и на коротких промежутках времени его погрешности могут быть весьма велики даже при достаточном числе видимых спутников. Кроме того, не всегда имеется достаточно статистической информации для формирования уравнений фильтра Калмана.

Аналитическое вычисление погрешностей БИНС при числе видимых спутников меньшем трех, рассматривалось в работах [16,19], но в этом случае для получения определенной системы уравнений типа (5) или (8) использовались дополнительные источники навигационных данных – высотомер, датчик воздушной скорости, и.т.п. Вопрос об аналитическом определении погрешностей БИНС при числе видимых спутников меньшем трех без использования дополнительных датчиков в литературе не рассматривается.

Таким образом, для маневренного объекта с малым временем полета представляется целесообразным разработка конечных алгебраических алгоритмов получения оценок погрешностей БИНС при любом количестве видимых спутников.

Список литературы

1. Айсфеллер Б., Кройе К., Санроша Д., Люк Т. Разработка и анализ технических и эксплуатационных характеристик сильносвязанной системы ГСНС/ИНС // Гироскопия и навигация. 2003. №2. С. 74-64.

2. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под. Ред. А.И Перова, В.Н. Харисова. Изд. 3-е, перераб. М.: Радиотехника, 2005. 688 с.

3. Герцман В.Е., Экало А.В., Зайцев В.М., Шпекторов С.Л., Герастовский В.Ф., Махненко Ю.Ю., Прут В.И. Анализ погрешностей навигационной аппаратуры потребителя ГЛОНАСС/GPS при проведении траекторных измерений // Гироскопия и навигация. 2005. №3. С. 3-13.

4. Дмитриев С.П., Степанов О.А., Кошаев Д.А. Исследование способов комплексирования данных при построении инерциально-спутниковых систем // Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации. Сборник статей и докладов. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2001. С. 43-59.

5. Дмитриев С.П., Степанов О.А. Неинвариантные алгоритмы обработки информации инерциальных навигационных систем // Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации // Сборник статей и докладов. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2001. С. 67-82.

6. Анучин О.Н., Емельянцев Г.И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов; под общей редакцией В.Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ ЦНИИ «Электроприбор», 1999. 357 с.

7. Каспар Б., Нил Даллен. Демонстрация модуля наведения DARPA, использующего информацию GPS, на самолете F/A-18 ВМФ США // Гироскопия и навигация. 1999. №1. С. 94-99.

8. Лич Б. Недорогие бесплатформенные инерциальные системы, интегрированные с GPS, для проведения летных испытаний // Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации. Сборник статей и докладов. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2001. С. 67-82.

9. Помеле П.М., Порталь Д., Клемансо Ж.П. Тотем 3000: новое поколение ИНС/GPS фирмы SEXTANT AVIONIQUE // Гироскопия и навигация. 1999. №1. С. 86-93.

10. Резниченко В.И., Калинов М.И. Применение аппаратуры спутниковых навигационных систем на кораблях и судах морского флота. СПб.: ГНИНГИ МО РФ. 2005. 96 с.

11. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. М.: Эко-Трендз. 2000. 267 с.

12. Степанов О.А. Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации // Гироскопия и навигация. 2002. №1. С. 23-45.

13. Степанов О.А. Особенности построения и перспективы развития навигационных инерциально-спутниковых систем // Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации. Сборник статей и докладов. СПб.: ГНЦ-ЦНИИ «Электроприбор», 2001. С. 25-43.

14. Степанов О.А. Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. СПб.: ГНЦ ЦНИИ «Электроприбор», 1998. 370 с.

15. Тазьба А.М., Леви Ю.В., Ермолина М.А. Структура интегрированных навигационных систем на базе бесплатформенных инерциальных систем средней точности // Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации. Сборник статей и докладов. СПб.: ГНЦ-ЦНИИ «Электроприбор», 2001. С. 115-126.

16. Фомичев А.А., Успенский В.Б., Счастливец К.Ю., Брославец Ю.Ю., Колчев А.Б. Комплексирование информации в интегрированной навигационной системе с лазерными гироскопами на основе обобщенного

фильтра Калмана // Труды X Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор». 2003. С. 98-100.

17. Ярлыков М.С., Базаров А.А., Салямех С.С. Помехоустойчивый навигационно-посадочный комплекс на основе спутниковой радионавигационной системы // Радиотехника. 1996. №2. С. 3-11.

18. George T. Schmidt INS/GPS Technology Trends // Advances in Navigation Sensors and Integration Technology – RTO Lecture Series on 27 - 28 May 2004 in St. Petersburg, Russia and on 31 May - 1 June 2004 in Moscow, Russia.

19. George T. Schmidt, Richard E. Phillips INS/GPS Integration Architectures // Advances in Navigation Sensors and Integration Technology – RTO Lecture Series on 27 - 28 May 2004 in St. Petersburg, Russia and on 31 May - 1 June 2004 in Moscow, Russia.

20. Dr J. Richard Fountain Silicon IMU for Missile and Munitions Applications// Advances in Navigation Sensors and Integration Technology – RTO Lecture Series on 27 - 28 May 2004 in St. Petersburg, Russia and on 31 May - 1 June 2004 in Moscow, Russia.

21. Salychev O.S. Applied inertial navigation: problems and solutions/ Moscow, Russia BMSTU press. 2004. 302 p.

Богданов Максим Борисович, канд. техн. наук, доцент, bmb75@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

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

Смирнов Владимир Александрович, канд. техн. наук, доцент, veld071@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Савельев Валерий Викторович, д-р техн. наук, профессор, pbs.tuls@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Соловьев Александр Эдуардович, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, soaled@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

OVERVIEW OF COMPLEXING METHODS IN INTEGRATED NAVIGATION SYSTEMS

M.B. Bogdanov, A.V. Prokhotsov, V.V. Saveliev, V.A. Smirnov, A.E. Soloviev

A review of the existing methods for integrating data from a freeform inertial navigation system and from a satellite radio navigation system, which are part of the integrated navigation and orientation systems, is presented.

Key words: integration methods, satellite navigation system, Kalman filter, strapdown inertial navigation system.

Bogdanov Maxim Borisovich, candidate of technical sciences, docent, bmb75@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Prokhortsov Alexey Vyacheslavovich, candidate of technical sciences, docent, head of department, proxav@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Smirnov Vladimir Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, veld071@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Saveliev Valeriy Viktorovich, doctor of technical sciences, professor, pbs.tuls@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Soloviev Alexander Eduardovich, doctor of technical sciences, docent, head of the department, soaled@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.396

ПРИЗНАКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАЦИОНАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В СЛУЖЕБНОМ РАДИООБМЕНЕ

П.А. Агеев, П.А. Заика, А.М. Кудрявцев

В статье рассматриваются основные признаковые характеристики международной и национальных измерительных систем в служебном радиообмене.

Ключевые слова: система СИ, национальная измерительная система, система стандартов, физическая величина, служебный радиообмен, геополитический регион, геостратегический центр силы, глобализация, блок НАТО.

Современный мир в своей взаимосвязанности является единым силовым политическим полем. Распределение и баланс сил в одном регионе неизбежно влияет на распределение и баланс сил в других регионах. Любой геополитический регион мира не настолько отдален и изолирован, чтобы обладать стратегической независимостью, не иметь силовых узлов, оставаться вне силовых оценок и давлений.

Международные отношения в основном выстраиваются в определенной иерархической системе, в том смысле, что более сильные государства теми или иными способами навязывают свои предложения, оказывают свое влияние на менее сильные страны. В современном мире сложилось четыре глобальных геостратегических центра силы, и лидирующим из них является Атлантический, в состав которого входят США, Великобритания и Канада.

Тенденции глобализации при подавляющем доминировании Атлантического центра сил (англо-американского мира) нашли свое отражениеи в порядке применения мер (единиц) физических величин в самых различных сферах жизнедеятельности мирового сообщества. Выражается это в том, что фактически происходит игнорирование Международной системы единиц измерений (система СИ – Système Internationald'Unités, SI), разработанной с задачей создания единой когерентной (согласованной) системы измерений единиц физических величин для всего мира [1].

Международная система единиц измерений берет свое начало от десятичной метрической системы, разработанной после Французской революции в период правления Наполеона Бонапарта. Первоначально она основывалась на двух величинах – метре и килограмме. Со временем эта система единиц развивалась и сейчас она включает семь основных единиц.

Следует отметить исторический фактор значимости Франции, которая являлась и является не только географическим и культурным центром Европы, но и источником научных и технических инноваций. Начинаяс конца XV века, правления Карла VIII, Франция была и до нашего времени остается не только самой крупной и густонаселенной страной Европы, но и самостоятельным центром силы.

Явное противопоставление Атлантического центра силы Объединенной Европе отражается буквально во всех сферах развития стран мира: в политике, в экономике, в культуре, в вооруженных силах и др.

Наглядным примером стремления к доминированию является применение в системах управления войсками, в организации связи, в служебном и оперативном радиообмене, в управлении международным воздушным и морским движением и т. п. национальных (англо-американских) систем измерения физических величин, а немеждународной системы единиц измерений СИ. К этому же сводится доктрина перевода всех вооруженных сил стран блока НАТО, их сателлитов на систему стандартов США – STANAG (Standardization Agreement – соглашение по стандартизации). Данная система стандартов устанавливает и определяет терминологию, условия, способы, порядок действий и прочее для унификации (приведения к единообразию) в рамках ОВС НАТО вооружения и военной техники, средств материального обеспечения и т. д. при планировании и проведении военных операций [2-3]. В число соглашений по стандартизации, которых насчитывается чуть менее 1300, входят стандарты по калибрам стрелкового оружия и боеприпасов, по способам и видам радиосвязи, по картографическим обозначениям и классификации мостов и сооружений и многое другое. Например, STANAG 4512 Infantry Weapons Standardization – соглашение по «Стандартизации пехотного оружия».

В статье предлагается в систематизированном виде рассмотрение признаковых особенностей радиообмена ВС США и Великобритании, проявляющиеся в применении национальных систем единиц измерений различных физических величин.

Используемые в служебном радиообмене ВС США и ОВС НАТО, ВС Великобритании национальные единицы измерения и их условные сокращения приведены в табл. 1. Исключительность взглядов США и Великобритании, в том числе на применение значений национальных единиц измерений физических величин, например, миля, фут, галлон и пр., вызывает определенные трудности при интерпретации получаемой в ходе ведения мониторинга информации. Поскольку многообразие информации включает в себя сведения о потенциальном противнике, оперативно-технические, технико-экономические, военно-политические описания объ-

ектов, описания их назначения и характера деятельности, а также характеристик и параметров радиоэлектронных средств самых различных сфер деятельности, то необходимо знать и уметь работать с национальными системами измерений физических величин США и Великобритании.

Таблица 1

Используемые в служебном радиообмене ВС США (ОВС НАТО) и ВС Великобритании национальные единицы измерения и их условные сокращения

Служебная фраза радиообмена (оригинал)	Служебная фраза радиообмена (перевод)	Единица измерения, используемая в радиообмене	Единица измерения СИ
СВ			
beforepurpose 12 **miles** (**ml**)	до цели 12 **миль**	миля (уставная) =5280 футов	1609,34 м
theradius … 20 **yards**	радиус … 20 **ярдов**	ярд = 3 фута	0,9 м
longprojectile 8 **foots**	длина снаряда 8 **футов**	фут = 12 дюймов	0,3 м
the diameter … 12 **inches**	диаметр … 12 **дюймов**	дюйм	2,54 см
provision by fuel … 4000 **tons**	обеспечениетопливом … 4000 **тонн**	тона (малая) =2000 фунтов	907,2 кг
has delivered 65000 **pound** (**pn, lb**) of fuel	доставил 65000 **фунтов** топлива	фунт	410 г
we've taken 40000 **lbs** (**pound**) of fuel	мы приняли 40000 **фунтов** топлива	фунт	410 г
we have taken 80000 **barrels** (**ba**) to crude oil	мы приняли 80000 **баррелей** сырой нефти	баррель = 42,2 галлона	158,97 л
cargo by weight 24 **tons** (**tn**)	груз весом 24 **тонны**	тонна = 2204,6 фунтов	1000 кг
ВВС			
the lifting mass … 16 **tons** (**tn**)	подъемная масса … 16 **тонн**	тонна (малая) =2000 фунтов	907,2 кг
leading-in … 200 **barrels** (**ba**) fuel	заправка … 200 **баррелей** топлива	баррель (для жидкости) =31,5 галлонов	119,2 л / 0,16 м^3
leading-in … 700 **gallon** (**gl**) fuel	заправка … 700 **галлонов** топлива	галлон	4,55 л
velocity of the flight 0,9 **Mach**	скорость полета 0,9 **Маха**	Мах	1198,8 км/ч /333 м/с
theheighton … 28 **foots**	высота над … 28 **футов**	фут	0,3 м
height of the flight 340 **hfs**	высота полета 340 **гектофутов**	гектофут = 100 футов	30 м
ВМС			
beforepoint … 24 **mls** (**miles**)	до пункта … 24 **мили**	миля (морская) =10 кабельтов	1,852 км
purposein … 40 **cables**	цель в … 40 **кабельтов**	кабельтов	185,325 м
thevelocity … 40 **knotes** (**kn**)	скорость … 40 **узлов**	узел	1,85 км/ч
onboard 4000 **bas** (**barrels**)	на борту 4000 **баррелей**	баррель (для жидкости) =31,5 галлонов	119,2 л / 0,16 м^3
delivery … 8000 **gallons**(**gl**)	доставка … 8000 **галлонов**	галлон	4,4 л

Поскольку многообразие информации включает в себя сведения о потенциальном противнике, оперативно-технические, технико-экономические, военно-политические описания объектов, описанияих назначения и характера деятельности, а также характеристик и параметров радиоэлектронных средств самых различных сфер деятельности, то необходимо знать и уметь работать с национальными системами измерений физических величин США и Великобритании.

Прямые и косвенные признаки радиообмена, связанные с единицами измерений физических величин, дают возможность установления национальной принадлежности объектов, вида и рода войск, назначения и т. п.

При работе с материалами радиообмена все американские и английские меры длины, веса, площади и объема, а также калибры требуется переводить в метрические. Исключения могут составлять дюймы, футы и мили в сообщениях военно-морской тематики.

Перевод основных мер национальных физических величин США и Великобритании приведены в табл. 2.

Таблица 2

Перевод основных мер национальных физических величин США и Великобритании

Мера(unit)	Морская миля	Уставная миля	Километр	Кабельная длина	Морская сажень	Метр	Ярд	Фут	Дюйм	Сантиметр
Морская миля (nautical mile)	–	1,1516	1,8532	8,445	1,013.4	1,853.2	2,026.8	6,080.27	72,963	185,325
Уставная миля (statute mile)	0,8684	–	1,6093	7,333	880	1,609.3	1,760	5,280	63,360	–
Километр (kilometer)	0,5396	0,6214	–	4,557	546,8	1,000.0	1,093.6	3,281	39,370	100,000
Кабельная длина (cable length)	0,1184	0,1364	0,2195	–	120	219,5	240	720	8,640	21,945
Морская сажень (fathom)	–	–	–	–	–	1,829	2	6	72	182,88
Метр (meter)	–	–	–	–	0,5468	–	1,0936	3,281	39,37	100
Ярд (yard)	–	–	–	–	0,5000	0,9144	–	3	36	91,44
Фут (foot)	–	–	–	–	0,1667	0,3048	0,3333	–	12	30,48
Дюйм (inch)	–	–	–	–	–	–	–	0,0833	–	2,540
Сантиметр (centimeter)	–	–	–	–	–	–	–	0,0328	0,3937	–

Рассмотрим некоторые особенности применения значений национальных единиц измерений физических величин США и Великобритании.

Время. Время в радиообмене передается арабскими цифрами по 24-часовому циферблату формата H:mm:ssc указанием административного часового пояса (timezones), например, UTC+07:00 16:45:20, UTC-04:3003:20:45 (UTC, Coordinated Universal Time – всемирное координированное время, введенное взамен Гринвичского гражданского времени – Greenwich Civil Time, GCT). Под административным часовым поясом (в РФ с 2011 года – часовая зона) принят участок земной поверхности, на котором в соответствии с некоторым административным законом установлено определенное официальное время. Поверхность Земли разделена на 24 часовых пояса. Часовые пояса относительно нулевого меридиана обозначают положительное (к востоку) и отрицательное (к западу) смещение от UTC. Нулевым является тот меридиан, который проходит через Гринвичскую обсерваторию в пригороде Лондона.

Территория США административно входит в шесть часовых поясов. Континентальная часть США разделена на четыре часовых пояса: восточный (EST, Eastern Standard Zone, UTC-05) с центральным меридианом 75°з.д., центральный (CST, Central Standar dZone, UTC-06) – 90° з.д., горный (MST, MountainStandardZone, UTC-07) – 105° з.д., тихоокеанский (PST, Pacific Standard Zone, UTC-08) – 120° з.д. На Аляске установлен Аляскинский часовой пояс (AKST, UTC-09), на Гавайских и Алеутских островах – Гавайско-алеутский часовой пояс (HAST, UTC-10). Различают также Атлантический часовой пояс (AST, UTC-04), часовые пояса Самоа (SST, UTC-11) и Чаморро (ChST, UTC-10).

Для обозначения часового пояса применяют и буквенные обозначения: Z – для нулевого пояса, A-M – для восточных поясов, N-Y– для западных поясов и J – для обозначения местного солнечного времени. Сокращения типа: AM (Ante Meridiem – до полудня, утром, с 00:00 до 12:00 часов), PM (Post Meridiem – после полудня, с 12:00 до 24:00 часов), BMNT (Beginningof Morning Nautical Twilight – начало навигационного рассвета), EENT (Endof Evening Nautical Twilight – конец вечерних навигационных сумерек), как и светлое время (daylight) или сумерки (dusk) в радиообмене не употребляются.

Даты указываются с обозначением числа, месяца и года, например, 06 August 2015. Если числа месяца указываются через тире, это означает «в ночь с … на …». Например, night 04-05 August – в ночь с 4 на 5августа.

Для одновременного обозначения времени и даты (DTG, date-time-group) в радиообмене используется 6-значная цифровая группа. Первые две цифры обозначают число месяца, две следующие – часы, две последние – минуты. За цифровой группой следуют название месяца и год. Например, группа 010509 z August 2015 означает 01 августа 2015 года в 05 часов 09 минут по Гринвичу.

При действии войск в различных часовых поясах время может обозначаться по общемировому времени (UTC, или GCT), либо по часовому поясу, в пределах которого географически находятся соединения (части, подразделения) сухопутных войск.

Для обеспечения безопасности полетов гражданской авиации и движения морских судов используют только всемирное координированное время, по значениям которого функционируют спутниковые системы навигации ГЛОНАС и GPS (Global Positioning System – система глобального позиционирования).

Артиллерия. Калибром орудия называется диаметр канала ствола по полям нарезов свыше 23 мм. В вооруженных силах США и стран-участниц блока НАТО для его обозначения используют миллиметры, или дюймы (caliber 155-mm, или 6-inch) [4].

Длину ствола орудия принято обозначать количеством его калибров, реже в сантиметрах. Например, 34-calibergun – орудие с длиной ствола34-и калибра.

В обозначении параметров ствола артиллерийских орудий используется соотношение калибров с длиной ствола, при этом первое число – калибр ствола – обозначается в миллиметрах, втрое число – длина ствола – обозначается в калибрах. Например, самоходная гаубица «Палладин» – параметры орудия155/39. Современные артиллерийские орудия имеют длину ствола 40-50 калибров. Условной границей между гаубичным и пушечным стволом считается его длина в 40 калибров.

Дальности (расстояния) до цели измеряют в милях. Например, target 4 miles – до цели 4 мили.

В радиообмене ВС США направления на объект (цель) указываются в углах по дирекционному, магнитному или истинному азимуту в градусах, или тысячных. Тысячная может быть артиллерийской (artillerymil) или пехотной (infantrymil). Артиллерийская тысячная равна 1/6400 части окружности (угол, образуемый дугой длиной 1 ярд на расстоянии 1000 ярдов). Пехотная тысячная по своей абсолютной величине больше артиллерийской: 100 пехотных тысячных равны 101,8 артиллерийской тысячной, или 5,7°, а 100 артиллерийских тысячных равны 98,2 пехотной тысячной, или 5,6°. при переводе следует помнить, что тысячная, принятая в ВС РФ, равна 1/6000 части окружности.

Стрелковое оружие. Калибром стрелкового оружия называется диаметр канала ствола между противоположными полями нарезов до 23 мм, а также диаметр пули. Калибры нарезного стрелкового оружия измеряются в целых, десятых и сотых долях миллиметра, например, 7.62 мм. Линейная система – дань старой традиции, когда калибр нарезного огнестрельного оружия измерялся в "линиях", т. е. в долях дюйма (1 дюйм = 25,4 мм = 10 линиям = 100 точкам). Отсюда калибр винтовки И. С. Мосина образца 1881 года (так называемая "трехлинейка") составляет 3 линии, или 7.62 мм.

Кроме метрической системы в некоторых странах, и прежде всего в США и Великобритании, используется имперская, или дюймовая система счисления. В дюймовой системе калибры обозначаются в сотых (в США) или тысячных (в Великобритании) долях дюйма, но без ведущего ноля, т. е. калибр .50 обозначает 0.5 дюйма или 12.7 мм, а.30 обозначает 0.3 дюйма или 7.62 мм.

Следует иметь в виду, что обозначение калибра патрона может быть условным. Например, револьверные патроны .38 S&W Special и .357 Magnum фактически имеют один калибр (фактический диаметр пули 0.355 – 0.357 дюйма), но различаются размером гильзы. Аналогично пистолетные патроны .38 Super (9 × 23SR) и .357SIG (9 × 22) имеют одинаковый диаметр пуль 0.355 дюйма, но различаются формой и размером гильз.

Наиболее распространенные соотношения калибров в дюймовой и метрической системе приведены в табл. 3.

Таблица 3

Соотношение калибров в дюймовой и метрической системе

Калибр в дюймовой системе	Номинальный калибр, мм	Фактический калибр, мм
.22	5.6	5.42–5.6
.30, .32	7.62, 7.63, 7.65	7.6–7.85
.357, .38, .380	9.0	8.70–9.25
.40, .41	10.0	10.0–10.2
.45	11.43	11.26–11.35

Управление воздушным движением. В начале 70-х годов XX века в связи с плотностью и интенсивностью воздушного движения в стране гражданских и военных воздушных судов в едином воздушном пространстве, и с целью соблюдения безопасности полетов, органы управления воздушным движением (УВД) гражданских и военных ведомств были объединены в Единую систему.

В действующей на текущий момент системе управления согласно Воздушному кодексу РФ управление воздушным движением возложено на органы Единой системы управления воздушным движением и ведомственные управления в пределах зон ответственности. А именно: организация использования воздушного пространства для полетов гражданских и военных воздушных судов и других видов деятельности, связанной с использованием воздушного пространства; определение воздушных трасс, местных воздушных линий, районов аэродромов и других элементов структуры воздушного пространства; обеспечение единой политики УВД; внедрения автоматизированных систем УВД и пр.

В США управление воздушным движением осуществляется Федеральным управлением гражданской авиации (FAA, FederalAviationAdministration), которое является отделением министерства транспорта.

Используемые в радиообмене международной организацией гражданской авиации ИКАО (ICAO, InternationalCivilAviationOrganization) единицы измерения и условные сокращения приведены в табл. 4.

Неотъемлемым элементом Единой системы управления воздушным движением является служба автоматической передачи информации в районе аэродрома (АТИС – ATIS, Automatic Terminal Information Service). Служба АТИС обеспечивает прием, обработку и вещание метеорологической, аэродромной, орнитологической (картографические данные о видах птиц, опасных для самолетов, интенсивности их перелетов, направлений, высот и т. п.) информации для аэродрома с международными и российскими стандартами для сводок АТИС.

Таблица 4

Используемые в радиообмене ИКАО единицы измерения

Служебная фраза радиообмена (оригинал)	Служебная фраза радиообмена (перевод)	Единица измерения, используемая в радиообмене	Единица измерения СИ
490 / F310, или N0494 / F0310	скорость 490 **узлов** / высота 310 **гектофутов**	узел гектофут = 100 футов	1,85 км/ч 30 м
M074 / F370	скорость 0,74 **Маха** / высота 370 **гектофутов**	Mах гектофут = 100 футов	1198,8 км/ч / 333 м/с 30 м

При формировании сводки каждому новому сообщению присваивается буквенный индекс (код). Этот код передается в виде буквы латинского алфавита в начале и в конце сообщения. Тем самым диспетчер наземной службы определяет степень необходимости предоставления экипажу новой информации. Например: Information Lima, 17.30, Runway 23 left, humid, traction 023, in region before land in gdirect possible become birds, wind beside the land 6, visibility 80, … , report reception a Lima (информация Лима, 17.30, ВВП 23 левая, влажная, сцепление 023, в районе предпосадочной прямой возможны стаи птиц, ветер у земли 6, видимость 80, … , сообщите получение Лима).

Аэродромные знаки (указатели), используемые при оборудовании аэродромов и взлетно-посадочных полос (ВВП), совместно со светосигнальным оборудованием, обеспечивают возможность пилотам выполнять требуемые маневры (взлет, посадка и др.). Аэродромные знаки представляют собой, в основном, буквы белого цвета, нанесенные на красном фоне, и предписывают строгое им следование (выполнение).

Управление морским движением. В мире с целью обеспечения безопасного движения гражданских и военных морских судов действует Автоматизированная идентификационная система (АИС – AIS, Automatic Identification System).

Система АИС служит для повышения уровня безопасности мореплавания, эффективности судовождения и эксплуатации Центра управления движением судов и позволяет отслеживать местонахождение судна на морских порталах Internet. Сообщение АИС содержит: идентификационную информацию о судне и его состоянии, данные о географических координатах и времени, дополнительную информацию, вводимую вручную, связанную с безопасностью движения судна. Аппаратно система АИС включает в себя устройства передачи уникального идентификационного номера IMO (International Maritime Organisation) и идентификатора морской подвижной службы MMSI, которые присваиваются морскому судну на основе Регистра судоходства Ллойда в соответствии с требованиями Международной морской организации (ММО). Например, IMO: 8434324 иMMSI: 338842000 принадлежат военному вспомогательному судну «USS GRASP», или IMO: 8523137 – ролкер-контейнеровозу «USNS LCPL Roy M. Wheat»(изначально гордость Черноморского морского пароходства СССР «Владимир Васляев») Командования морских перевозок военно-морских сил США. Номер IMO сохраняется на протяжении всего срока

службы судна и не подлежит изменению ни при каких условиях. Присвоение номера IMO для новых судов осуществляется при регистрации судна, а зачастую еще на стадии закладки и в процессе строительства.

Военные корабли стран мира оснащаются приемо-передатчиками системы АИС. Однако включение передатчиков АИС на боевых кораблях военно-морских сил США происходит крайне редко, что, по существу, противоречит требованиям ММО по обеспечению безопасности морского судоходства. Последнее время участились инциденты входа различных судов без опознавания в порты Черного моря, что угрожает безопасности международного морского движения в акватории Черного моря.

Таким образом, результатами глобализации информационных процессов в мире со стороны США и Великобритании в радиообмене военных и коммерческих воздушных и морских судов стало превалирование служебных фраз и сокращений национальных – американских и английских – систем измерения, и в меньшей степени – международной системы измерений (системы СИ) [4].

Список литературы

1. Стоцкий Л.Р. Физические величины и их единицы. М.: Просвещение, 1984. 239 с.

2. Челышев В.Д., Якимовец В.В. Зарубежные радиоэлектронные системы наземного и спутникового мобильного радиосервиса. Спб.: ВАС, 2012. 388 с.

3. Советская военная энциклопедия (в 8 томах). М.: Воениздат, 1976.

4. Сидорин А.Н., Прищепов В.М., Акуленко В.П. Вооружённые силы США в XXI веке. М.: Кучково поле. Военная книга, 2013. 800 с.

Агеев Павел Александрович, преподаватель, pol18deligne@rambler.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Заика Павел Валентинович, преподаватель, pashasever@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Кудрявцев Александр Михайлович, д-р воен. наук, профессор, pol18deligne@rambler.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного

SIGNAL CHARACTERISTICS OF NATIONAL MEASURING SYSTEMS IN OFFICIAL RADIO EXCHANGE

P.A. Ageev, P.V. Zaika, A.M. Kudrayvcev

The article is main characteristic characteristics of international and national measuring systems in official radio communication.

Key words: SI system, national measuring system, standards system, physical quantity, official radio exchange, geopolitical region, geostrategic center of power, globalization, NATO bloc.

Ageev Pavel Aleksandrovich, lecturer, pol18deligne@rambler.ru, Russia, Sankt-Petersburg, Military academy of telecommunications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Bydyonny,

Zaika Pavel Valentinovich, lecturer, pashasever@mail.ru, Russia, Sankt-Petersburg, Military academy of telecommunications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Bydyonny,

Kudrayvcev Aleksandr Mikhailovich, doctor of military sciences, professor, pol18deligne@rambler.ru, Russia, Sankt-Petersburg, Military academy of telecommunications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Bydyonny

УДК 621.391

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПОДГОТОВКИ И ПУСКА РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

А.Л. Копейка, И.В. Дорожко, А.Б. Кузнецов

В статье представлена имитационная модель оценивания комплексного показателя надежности (коэффициента готовности) с учетом показателей качества контроля технического состояния и диагностирования автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения в условиях деструктивных внешних воздействий, разработанная с помощью среды моделирования Stateflow программного продукта Matlab. Адекватность разработанной имитационной модели подтверждается аналитическими расчетами.

Ключевые слова: надежность, контроль, диагностирование, коэффициент готовности, достоверность, ошибки, марковский процесс, имитационная модель деструктивные внешние воздействия.

Выявление зависимостей между показателями надежности и качеством контроля технического состояния (ТС) является весьма актуальной задачей в настоящее время. Современные автоматизированные системы подготовки и пуска ракет космического назначения (АСПП РКН) предназначены для управления технологическими процессами (ТП) подготовки и пуска на стартовом и техническом комплексах (СК и ТК), имеют в своем составе встроенные средства аппаратного и программного контроля и диагностирования. Вопросы обеспечения требуемой надежности и достоверного, оперативного контроля рассматриваются, начиная с этапа проектирования объекта, и указываются в общих технических требованиях (ОТТ) и технических заданиях (ТЗ). Так, в ТЗ присутствуют разделы «Требования к диагностическому обеспечению» и «Требования надежности», в которых приводятся:

значения достоверности контроля (диагностирования);

периодичность контроля (диагностирования);

глубина диагностирования (например, до сменного модуля);

допустимые значения ошибок 1 и 2-го рода;

требования к средней наработке до (на) отказ и среднему (или максимальному) времени восстановления;

вероятность безотказной работы;

коэффициент готовности объекта.

Очевидная связь показателей качества контроля (диагностирования) и показателей надежности сложных технических комплексов на практике редко имеет формализованное описание и количественную оценку. В связи с этим, получение и исследование имитационных и аналитических моделей, связывающих показатели надежности и качества контроля, является достаточно востребованной задачей. Надежность средств контроля в статье не рассматривается.

Математическая модель, связывающая коэффициент готовности и достоверность контроля военно-технических систем. Ранее предложенная модель, связывающая показатели качества контроля (достоверность, ошибки 1 и 2-го рода и периодичность контроля) и коэффициент готовности сложных технических комплексов [4, 5], представлена в виде марковского процесса, граф которого изображен на рис. 1.

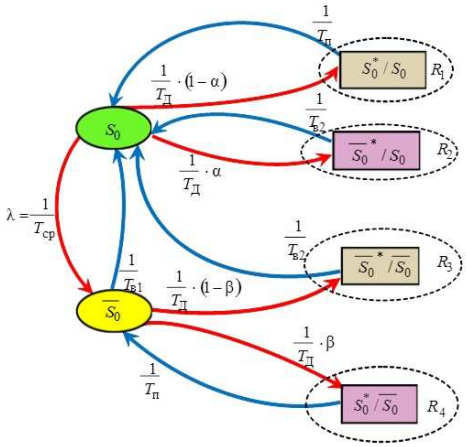


Рис. 1. Модель марковского процесса, связывающая показатели надежности и диагностирования

В качестве состояний марковского процесса выступают работоспособное и неработоспособное виды технического состояния объекта (S_0, $\overline{S_0}$), в которых контроль не проводится (т.е. «рабочий режим»), а также состояния, при которых производится контроль: R_1, R_3 – состояния, при которых проводится контроль с достоверным результатом (S_0^*/S_0 – система контроля фиксирует работоспособное состояние S_0^*, при этом объект действительно работоспособен S_0, $\overline{S_0^*}/\overline{S_0}$ – система контроля обнаруживает неработоспособное состояние $\overline{S_0^*}$, при этом объект действительно нера-

ботоспособен $\overline{S_0}$); R_2, R_4 – состояния, при которых проводится контроль с ошибочным результатом ($\overline{S_0^*}/S_0$ – система контроля обнаруживает неработоспособное состояние $\overline{S_0^*}$, а при этом объект работоспособен S_0, $S_0^*/\overline{S_0}$ – система контроля фиксирует работоспособное состояние S_0^*, а при этом объект неработоспособен $\overline{S_0}$).

На рис. 1 также введены следующие обозначения: α, β – вероятности ошибок контроля (ошибок 1-го и 2-го рода); $T_{\text{СР}}$ – средняя наработка на отказ; $T_{\text{Д}}$ – периодичность контроля; $T_{\text{В1}}$ – среднее время восстановления без применения средств контроля (т. е. предполагается, что объект можно восстановить даже при отсутствии или отказе средств контроля, например, с помощью последовательной замены блоков до тех пор, пока система не станет работоспособной, очевидно, что на это может потребоваться значительное время и ресурсы. Если без контроля объект не может быть восстановлен, то $T_{\text{В1}} \to \infty$); $T_{\text{В2}}$ – среднее время восстановления с учетом контроля; $T_{\text{П}}$ – средняя продолжительность перевода объекта из режима контроля в рабочий режим (если контроль происходит параллельно с работой объекта (функциональный контроль), то $T_{\text{П}}$ =0, но если производится тестовый контроль, при котором объект последовательно переводится из режима контроля в рабочий режим и обратно, то необходимо учитывать $T_{\text{П}}$).

Данная модель имеет следующие преимущества:

учет достоверности (или ошибок) результатов контроля;

возможность рассмотрения предельных случаев: отсутствие контроля и наличие постоянного контроля;

возможность рассмотрения тестового ($T_{\text{П}} \neq 0$) и функционального контроля ($T_{\text{П}} = 0$).

Аналитическая зависимость коэффициента готовности от показателей контроля сложных технических комплексов. По графу состояний (рис. 1) составим систему дифференциальных уравнений (ДУ):

$$\begin{cases} -\left(\frac{1}{T_{\text{Д}}}+\frac{1}{T_{\text{СР}}}\right)\cdot P_{S_0}(t)+\frac{1}{T_{\text{В1}}}\cdot P_{\overline{S_0}}(t)+\frac{1}{T_{\text{П}}}\cdot P_{R_1}(t)+\frac{1}{T_{\text{В2}}}\cdot\left(P_{R_2}(t)+P_{R_3}(t)\right)=\frac{d\left(P_{S_0}(t)\right)}{dt}; \\ \frac{1}{T_{\text{СР}}}\cdot P_{S_0}(t)-\left(\frac{1}{T_{\text{Д}}}+\frac{1}{T_{\text{В1}}}\right)\cdot P_{\overline{S_0}}(t)+\frac{1}{T_{\text{П}}}\cdot P_{R_4}(t)=\frac{d\left(P_{\overline{S_0}}(t)\right)}{dt}; \\ \frac{1-\alpha}{T_{\text{Д}}}\cdot P_{S_0}(t)-\frac{1}{T_{\text{П}}}\cdot P_{R_1}(t)=\frac{d\left(P_{R_1}(t)\right)}{dt}; \\ \frac{\alpha}{T_{\text{Д}}}\cdot P_{S_0}(t)-\frac{1}{T_{\text{В2}}}\cdot P_{R_2}(t)=\frac{d\left(P_{R_2}(t)\right)}{dt}; \\ \frac{1-\beta}{T_{\text{Д}}}\cdot P_{\overline{S_0}}(t)-\frac{1}{T_{\text{В2}}}\cdot P_{R_3}(t)=\frac{d\left(P_{R_3}(t)\right)}{dt}; \\ \frac{\beta}{T_{\text{Д}}}\cdot P_{\overline{S_0}}(t)-\frac{1}{T_{\text{П}}}\cdot P_{R_4}(t)=\frac{d\left(P_{R_4}(t)\right)}{dt}. \end{cases} \quad (1)$$

Из определения следует, что коэффициент готовности – это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. Исходя из графа, изображенного на рис. 1, объект имеет три состояния S_0, S_0^*/S_0, $\overline{S_0^*}/S_0$, при которых работоспособен. Но в состоянии $\overline{S_0^*}/S_0$ по результатам контроля объект признается отказавшим (ошибочный результат контроля) и восстанавливается, следовательно, данное состояние не может рассматриваться при расчете коэффициента готовности. А состояние S_0^*/S_0, хоть и имеет результатом контроля то, что объект работоспособен, но может учитываться при расчете коэффициента готовности только при условии, что контроль происходит параллельно с работой объекта (функциональный контроль, $T_{\text{П}}=0$). При тестовом контроле ($T_{\text{П}}\neq 0$) состояние S_0^*/S_0 не учитывается при расчете коэффициента готовности, так как является плановым периодом, в течение которого объект тестируется и применение объекта по назначению не предусматривается. Таким образом, для определения коэффициента готовности необходимо определить финальную вероятность состояния S_0. Следовательно, систему ДУ (1) для стационарного режима упрощаем до системы алгебраических уравнений (2):

$$\begin{cases} -\left(\frac{1}{T_{\text{Д}}}+\frac{1}{T_{\text{СР}}}\right)\cdot P_{S_0}+\frac{1}{T_{\text{В1}}}\cdot P_{\overline{S_0}}+\frac{1}{T_{\text{П}}}\cdot P_{R_1}+\frac{1}{T_{\text{В2}}}\cdot\left(P_{R_2}+P_{R_3}\right)=0; \\ \frac{1}{T_{\text{СР}}}\cdot P_{S_0}-\left(\frac{1}{T_{\text{Д}}}+\frac{1}{T_{\text{В1}}}\right)\cdot P_{\overline{S_0}}+\frac{1}{T_{\text{П}}}\cdot P_{R_4}=0; \\ \frac{1-\alpha}{T_{\text{Д}}}\cdot P_{S_0}-\frac{1}{T_{\text{П}}}\cdot P_{R_1}=0; \\ \frac{\alpha}{T_{\text{Д}}}\cdot P_{S_0}-\frac{1}{T_{\text{В2}}}\cdot P_{R_2}=0; \\ \frac{1-\beta}{T_{\text{Д}}}\cdot P_{\overline{S_0}}-\frac{1}{T_{\text{В2}}}\cdot P_{R_3}=0; \\ \frac{\beta}{T_{\text{Д}}}\cdot P_{\overline{S_0}}-\frac{1}{T_{\text{П}}}\cdot P_{R_4}=0. \end{cases} \qquad (2)$$

Так как все шесть состояний образуют полную группу событий, можно добавить для однозначного решения систем уравнений (1) и (2) нормирующие суммы – $P_{S_0}(t)+P_{\overline{S_0}}(t)+P_{R_1}(t)+P_{R_2}(t)+P_{R_3}(t)+P_{R_4}(t)=1$ и $P_{S_0}+P_{\overline{S_0}}+P_{R_1}+P_{R_2}+P_{R_3}+P_{R_4}=1$ соответственно.

Решение системы уравнений (2) в символьном виде относительно P_{S_0}, $P_{\overline{S_0}}$, P_{R_1}, P_{R_2}, P_{R_3}, P_{R_4} позволяет получить аналитическое выражение для коэффициента готовности (3):

$$K_{\Г} = P_{S_0} =$$

$$= \frac{T_{\СР} \cdot T_{\Д} \cdot (T_{\В1} \cdot (1-\beta) + T_{\Д})}{T_{\СР} \cdot T_{\В1} \cdot (1-\beta) \cdot (T_{\В2} \cdot \alpha + T_{\П} \cdot (1-\alpha)) + T_{\СР} \cdot T_{\Д} \cdot (T_{\П} \cdot (1-\alpha) + T_{\В1} \cdot (1-\beta)) +} \quad (3)$$

$$+ T_{\Д} \cdot (T_{\В1} \cdot T_{\В2} \cdot (1-\beta) + T_{\Д} \cdot (T_{\СР} + T_{\В1}) + T_{\СР} \cdot T_{\В2} \cdot \alpha + T_{\П} \cdot T_{\В1} \cdot \beta)$$

Если рассматривается функциональное диагностирование, то $T_{\П} = 0$ и формула (3) примет следующий вид:

$$K_{\Г} = \frac{T_{\СР} \cdot T_{\Д} \cdot (T_{\В1} \cdot (1-\beta) + T_{\Д})}{T_{\СР} \cdot T_{\В1} \cdot (1-\beta) \cdot T_{\В2} \cdot \alpha + T_{\СР} \cdot T_{\Д} \cdot T_{\В1} \cdot (1-\beta) + T_{\Д} \cdot (T_{\В1} \cdot T_{\В2} \cdot (1-\beta) + T_{\Д} \cdot (T_{\СР} + T_{\В1}) + T_{\СР} \cdot T_{\В2} \cdot \alpha)}. \quad (4)$$

Если рассматривается тестовое диагностирование без ошибок ($\alpha = 0$, $\beta = 0$), то формула (3) примет следующий вид:

$$K_{\Г} = \frac{T_{\СР} \cdot T_{\Д} \cdot (T_{\В1} + T_{\Д})}{T_{\СР} \cdot T_{\В1} \cdot T_{\П} + T_{\СР} \cdot T_{\Д} \cdot (T_{\П} + T_{\В1}) + T_{\Д} \cdot (T_{\В1} \cdot T_{\В2} + T_{\Д} \cdot (T_{\СР} + T_{\В1}))}. \quad (5)$$

Если рассматривается функциональное диагностирование без ошибок ($\alpha = 0$, $\beta = 0$, $T_{\П} = 0$), то формула (3) примет следующий вид:

$$K_{\Г} = \frac{T_{\СР} \cdot (T_{\В1} + T_{\Д})}{T_{\СР} \cdot T_{\В1} + T_{\В1} \cdot T_{\В2} + T_{\Д} \cdot T_{\СР} + T_{\Д} \cdot T_{\В1}} = \frac{T_{\СР}}{T_{\СР} + T_{\В1} \cdot \frac{T_{\В2} + T_{\Д}}{(T_{\В1} + T_{\Д})}}. \quad (6)$$

Если диагностирование вообще не учитывать (т.е. $T_{\Д} \to \infty$), то получим известную из теории надежности систем формулу [1, 3, 8, 9]:

$$K_{\Г} = \frac{T_{\СР}}{T_{\СР} + T_{\В1}}. \quad (7)$$

Имитационная модель для оценивания показателей надежности военно-технических систем с учетом показателей контроля и диагностирования. Последние версии программного продукта Matlab содержат в своем составе среду Stateflow [6, 10], предназначенную для построения моделей, подобных модели, изображенной на рис. 1. На рис. 2 представлена имитационная модель, построенная в среде Matlab.

Рассмотрим связь матрицы интенсивностей переходов и матрицы вероятностей переходов в марковских процессах. Для этого получим дифференциальное уравнение, описывающее марковский процесс, используя уравнение Колмогорова-Чепмена, в следующем виде:

$$P(t + \Delta t) = P(t) \cdot \mathbf{P},$$

где $\mathbf{P}$ – матрица вероятностей переходов;

$$P(t + \Delta t) - P(t) = P(t) \cdot \mathbf{P} - P(t);$$

$\frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t} = \frac{P(t) - (\mathbf{P} - \mathbf{E})}{\Delta t}$, где $\mathbf{E}$ – единичная матрица; $\dot{P}(t) = P(t) \cdot \mathbf{A}$,

где $\mathbf{A}$ – матрица интенсивностей переходов, $\mathbf{A} = \frac{\mathbf{P} - \mathbf{E}}{\Delta t}$.

Следовательно, $\mathbf{P} = \mathbf{A} \cdot \Delta t + \mathbf{E}$.

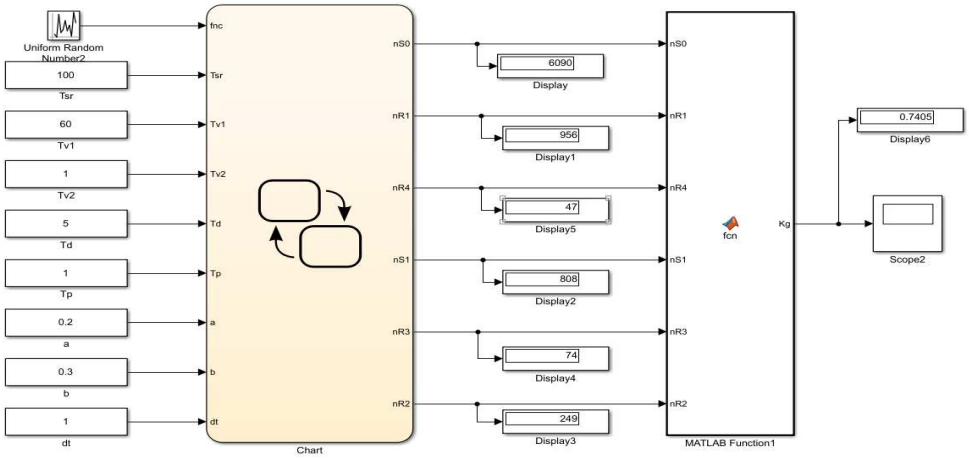


Рис. 2. Имитационная модель надежности и контроля, построенная в Stateflow (Matlab)

Для построения графа, входящего в блок «Chart» (рис. 2), от матрицы интенсивностей переходов (8) из систем уравнений (1) и (2) перейдем к матрице вероятностей переходов (9).

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{T_{Д}}+\frac{1}{T_{СР}}\right) & \frac{1}{T_{СР}} & \frac{1-\alpha}{T_{Д}} & \frac{\alpha}{T_{Д}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{В1}} & -\left(\frac{1}{T_{Д}}+\frac{1}{T_{В1}}\right) & 0 & 0 & \frac{1-\beta}{T_{Д}} & \frac{\beta}{T_{Д}} \\ \frac{1}{T_{П}} & 0 & -\frac{1}{T_{П}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{В2}} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{В2}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{В2}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{В2}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{П}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{П}} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{P}=\begin{bmatrix} 1-\left(\frac{1}{T_{Д}}+\frac{1}{T_{СР}}\right)\cdot\Delta t & \frac{1}{T_{СР}}\cdot\Delta t & \frac{1-\alpha}{T_{Д}}\cdot\Delta t & \frac{\alpha}{T_{Д}}\cdot\Delta t & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{В1}}\cdot\Delta t & 1-\left(\frac{1}{T_{Д}}+\frac{1}{T_{В1}}\right)\cdot\Delta t & 0 & 0 & \frac{1-\beta}{T_{Д}}\cdot\Delta t & \frac{\beta}{T_{Д}}\cdot\Delta t \\ \frac{1}{T_{П}}\cdot\Delta t & 0 & 1-\frac{1}{T_{П}}\cdot\Delta t & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{В2}}\cdot\Delta t & 0 & 0 & 1-\frac{1}{T_{В2}}\cdot\Delta t & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{В2}}\cdot\Delta t & 0 & 0 & 0 & 1-\frac{1}{T_{В2}}\cdot\Delta t & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{П}}\cdot\Delta t & 0 & 0 & 0 & 1-\frac{1}{T_{П}}\cdot\Delta t \end{bmatrix} \quad (9)$$

Построенная имитационная модель примет вид, изображенный на рис. 3 («Δt» обозначили как dt, так как $dt = \Delta t$ при $\Delta t \to 0$, а α, β обозначены как «*a*» и «*b*» соответственно). Логика работы данной имитационной модели такая же, как и у модели, изображенной на рис. 1 и описанной в работах [4, 5].

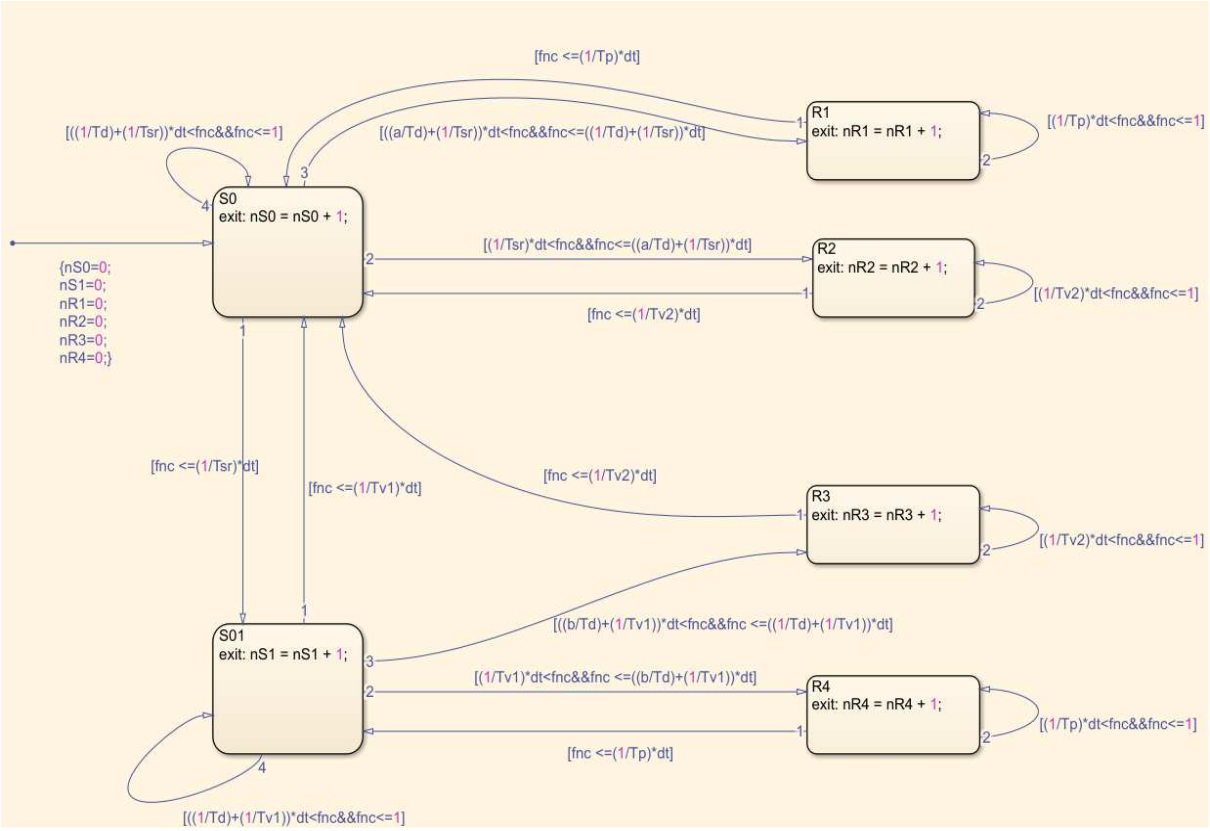


Рис. 3. Содержание блока «Chart» в Stateflow (Matlab)

Для проверки на адекватность, разработанной имитационной модели, влияние контроля и диагностирования на начальном этапе предлагается не рассматривать ($T_Д \to \infty$). На рис. 4 представлены результаты имитационного моделирования без учета результатов контроля и диагностирования (средства контроля выключены).

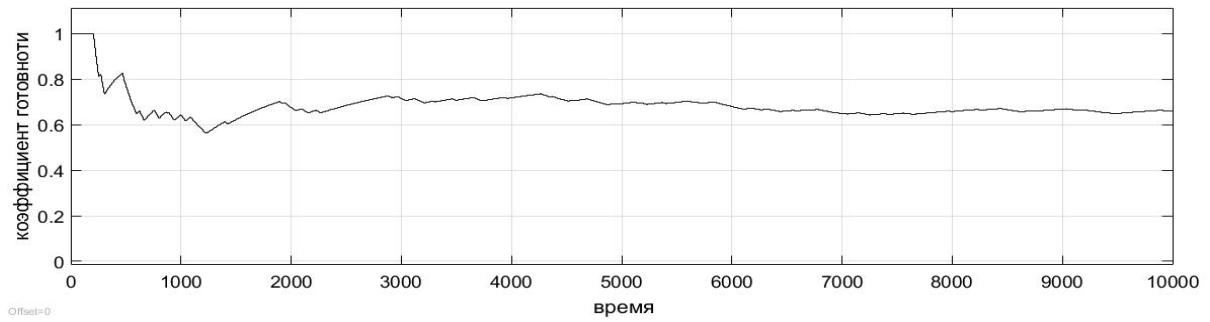


Рис. 4. Результаты имитационного моделирования в Stateflow (Matlab) при отсутствии влияния контроля (диагностирования)

Исходными данными для имитационного моделирования являлись следующие значения: $T_{СР}$=100 ч; $T_{В1}$=60 ч; $T_{В2}$=1 ч; $T_{Д}$=1000000 ч (т.е. период диагностирования очень большой: $T_{Д} \to \infty$); $T_{П}$=1 ч; $\alpha = \beta = 0$.

При этом коэффициент готовности, вычисленный по известной аналитической зависимости (7), составляет:

$$K_{Г} = \frac{T_{СР}}{T_{СР} + T_{В1}} = \frac{100\text{ч}}{100\text{ч} + 60\text{ч}} \approx 0.625.$$

Как видно из рис. 4, результаты, полученные с помощью имитационной модели, близки к результату, полученному с помощью аналитической модели.

Далее при имитационном моделировании учитывались только достоверные результаты контроля и диагностирования (т.е. $\alpha = \beta = 0$), при этом $T_{Д}$=5 ч. На рис. 5 представлены результаты имитационного моделирования.

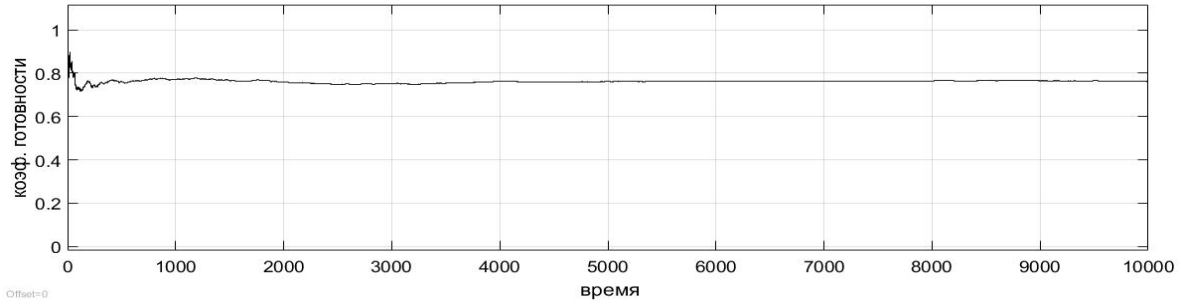


Рис. 5. Результаты имитационного моделирования при учете влияния контроля (диагностирования), но без учета ошибочных решений

Значение коэффициента готовности, вычисленное по аналитической модели (3), равно 0.797.

Затем учитывались ошибки 1-го и 2-го рода. Исходными данными для имитационного моделирования являлись следующие значения: $T_{ср}$=100 ч; $T_{В1}$=60 ч; $T_{В2}$=1 ч; $T_{Д}$=5 ч; $T_{П}$=1 ч; α=0.2 и β=0.3.

На рис. 6 представлены результаты имитационного моделирования.

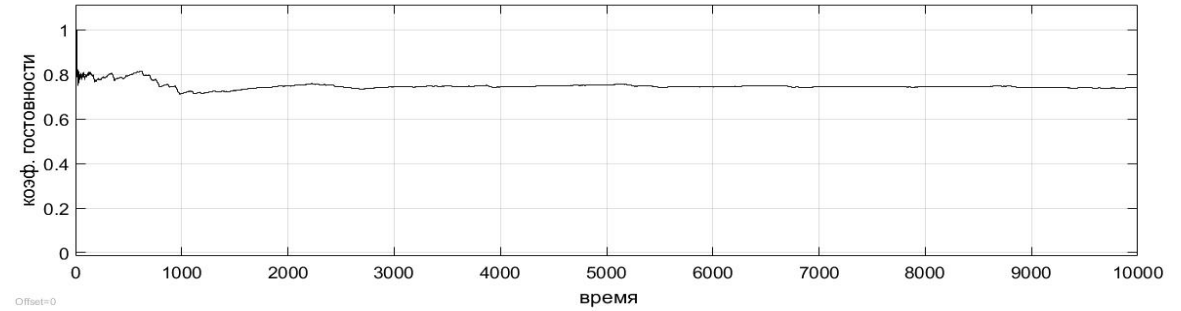


Рис. 6. Результаты имитационного моделирования в Stateflow (Matlab) с учетом показателей контроля и диагностирования

Значение коэффициента готовности, вычисленное по аналитической модели (3), равно 0.783.

Таким образом, с помощью разработанной имитационной модели были получены результаты, практически совпадающие с результатами вычислений по аналитической модели. Незначительные расхождения объясняются тем, что имитационная модель выдает конкретную реализацию работы комплекса, а аналитическая модель – обобщенную усредненную оценку. Повторив несколько раз эксперимент с имитационной моделью при одних и тех же исходных данных и обработав полученные результаты, можно получить полное совпадение результатов имитационной и аналитической моделей. При этом имитационная модель имеет ряд преимуществ по сравнению с аналитической моделью, а именно:

1. Аналитическое представление подходит лишь для простых объектов. Для военно-технических систем при составлении графа состояний необходимо учитывать различные режимы эксплуатации, больше состояний объекта, а, следовательно, значительно вырастет уровень сложности аналитического решения систем уравнений. К сожалению, аналитические решения невозможно найти для всех задач.

2. Данная имитационная модель в отличие от аналитической представляет не конечную систему уравнений, а развернутую схему с детально описанной структурой и поведением объекта.

3. Разработанную имитационную модель можно постепенно усложнять, дорабатывать, модифицировать. В качестве входных параметров, например $T_{\text{СР}}$, $T_{\text{Д}}$, использовать не константы, а изменяющиеся величины. Например, объект может иметь различное $T_{\text{СР}}$ в зависимости от деструктивного воздействия противника и среды.

Имитационное моделирование влияния деструктивных внешних воздействий на надежность АСПП РКН. Проведенный анализ показывает, что автоматизированное рабочее место (АРМ) или любое другое оборудование из состава АСПП РКН с учетом среды передачи энергии могут быть подвергнуты силовому деструктивному воздействию по трем основным каналам силового деструктивного воздействия (КСДВ): по сети питания (КСДВ1); по проводным линиям (КСДВ2); по эфиру с использованием мощных коротких электромагнитных импульсов [11]. Учитывая особенности размещения АСПП РКН на стартовом или техническом комплексах (протяженность линий электропередачи или управляющих каналов связи между оборудованием и возможностью скрытного оказания воздействия) СДВ оказывают влияние и на надежность оборудования АСПП РКН.

Воздействие по сети электропитания. Результаты оценки устойчивости элементов типового блока вторичного источника электропитания (ВИП) показывают, что ВИП недостаточны для защиты АРМ и другого оборудования АСПП РКН от СДВ. Между сетью питания и ВИП, как правило, устанавливают дополнительное устройство защиты (источник бесперебойного питания (UPS), стабилизатор, фильтр, сетевой кондиционер

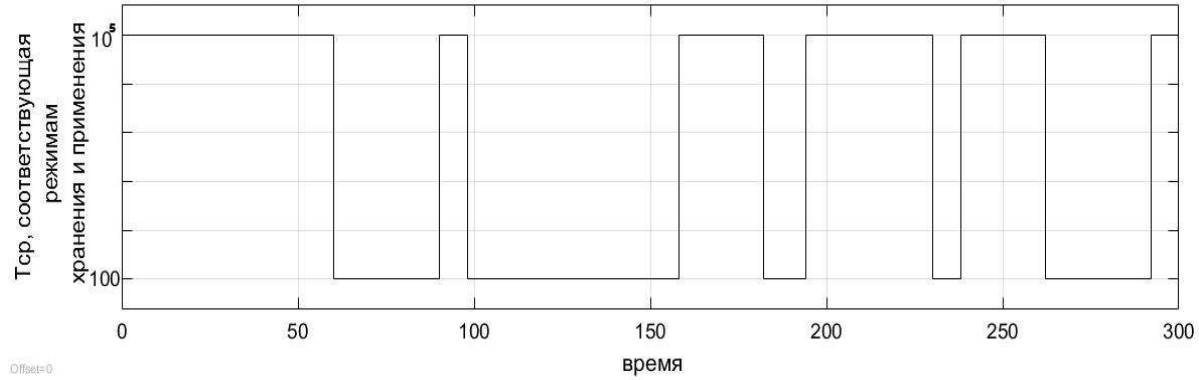
т.п.), которое так же необходимо учитывать при оценке устойчивости в СДВ. Обычно при СДВ по сети питания UPS выходит из стоя, причем в этом случае срабатывает байпас и через него энергия СДВ достигает цели в обход UPS. Кроме того, у тиристорных стабилизаторов, корректоров напряжения, переключателей сети при СДВ происходит самопроизвольное отпирание тиристоров вопреки штатному алгоритму схемы управления с аварийным отключением или выходом из стоя. Для осуществления СДВ используются специальные технические средства, которые подключаются к сети с помощью индуктивной связи через трансформатор. Прогнозы специалистов показывают, что вероятность использования СДВ растет год от года. Поскольку при разработке концепции безопасности объекта необходимо учитывать и возможность СДВ по сетям питания, то в первую очередь следует провести классификацию технических средств СДВ. Однако, учитывая специфическое назначение данных средств и нежелание фирм производителей широко афишировать свою работу, задача классификации оказывается не простой. В качестве примера высокой эффективности СДВ можно назвать относительно не дорогие устройства с электролитическими конденсаторами, имеющие удельную объемную энергию, равную 2000 кДж/м^3. Подобное устройство, размещенное в обычном кейсе, способно вывести из стоя до 20 компьютеров одновременно. Еще большую эффективность имеют молекулярные накопители (ионисторы) удельная объемная энергия которых достигает 10 МДж/м^3. Технические средства СДВ, содержащие ионисторы, уже способны вывести из стоя все компьютеры большого вычислительного центра.

Воздействие по проводным каналам. Для СДВ по проводным линиям требуется энергия на несколько порядков ниже, чем сети питания, и деструктивное воздействие может быть реализовано с помощью относительно простых технических средств, обеспечивающих высокую вероятность вывода объекта атаки из строя. Например, в составе некоторых средств деструктивного воздействия в качестве инжекторов могут быть использованы конструктивные элементы здания, канализация, водопровод, сеть питания объекта и т.п.

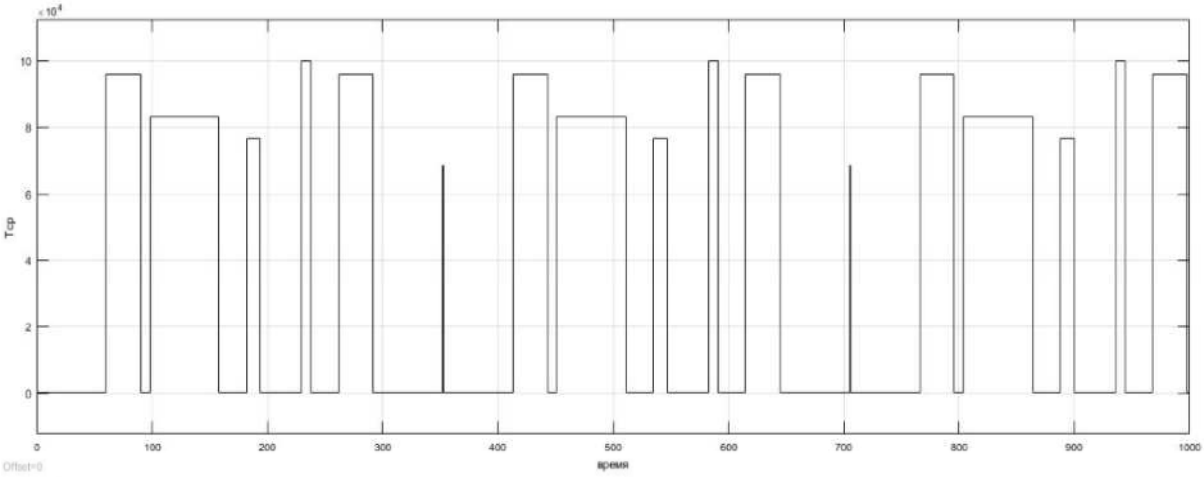
Воздействие по эфиру. Наиболее скрытным и эффективным является канал силового деструктивного воздействия по эфиру с использованием мощного короткого электромагнитного импульса. В данном случае можно реализовать достаточно компактные электромагнитные технические средства СДВ, размещаемые за пределами объекта атаки и для маскировки на достаточном удалении от коммуникаций.

На рис. 7 представлен график изменения $T_{\text{СР}}$ в зависимости от смены режимов эксплуатации (чередуются режимы хранения и применения по назначению) согласно технологическому графику и график изменения $T_{\text{СР}}$ в зависимости от деструктивного воздействия противника.

На рис. 8 представлен вид имитационной модели надежности и контроля с учетом смены режимов эксплуатации и деструктивных внешних воздействий.



а



б

Рис. 7. График изменения: а – T_{CP} в зависимости от режима эксплуатации; б – в зависимости от деструктивных внешних воздействий

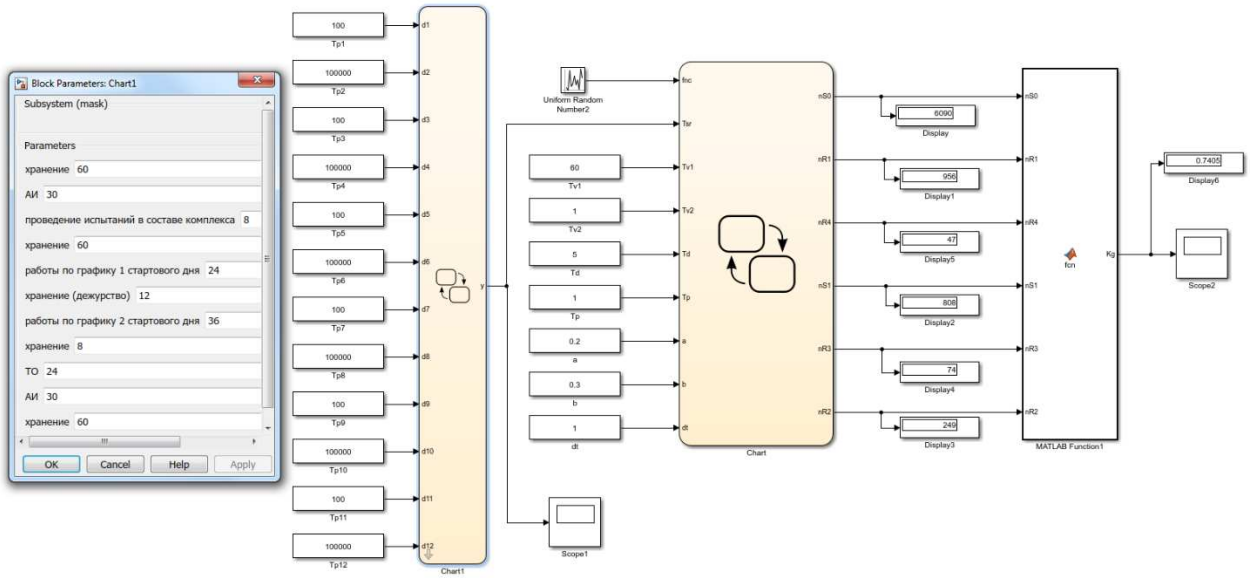
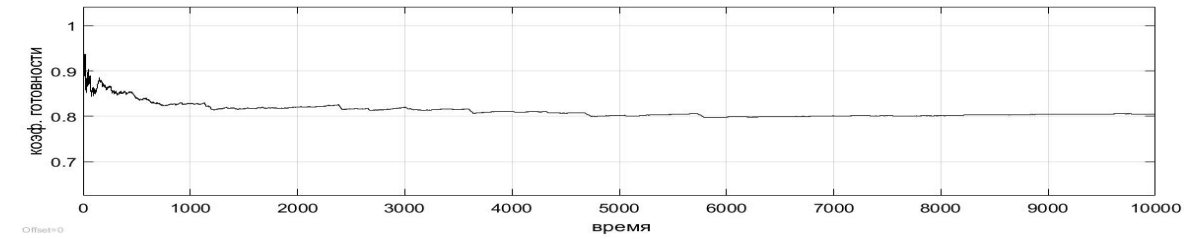
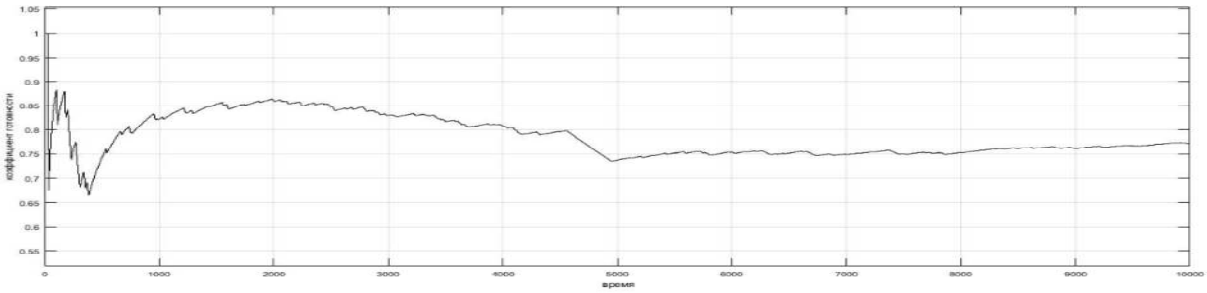


Рис. 8. Имитационная модель надежности и контроля, построенная в Stateflow (Matlab), в условиях деструктивных внешних воздействий

На рис. 9 представлены результаты имитационного моделирования коэффициента готовности АСПП РКН при деструктивных внешних воздействий.



а



б

Рис. 9. Результаты имитационного моделирования в Stateflow (Matlab) с учетом изменяющегося параметра: а - $T_{СР}$ – в зависимости от режимов эксплуатации; б – результаты имитационного моделирования с учетом изменяющегося параметра $T_{СР}$ в зависимости от деструктивных внешних воздействий

Таким образом, разработанная имитационная модель представляет наряду с аналитическими моделями дальнейшее развитие направлений, связанных с учетом показателей контроля и диагностирования АСПП РКН при оценивании показателей надежности. С помощью предложенной имитационной модели появляется возможность обеспечить высокий уровень детализации моделируемых процессов, можно учитывать различные режимы эксплуатации и деструктивные внешние воздействия. Дальнейшее развитие имитационной модели представляется в решении задач обеспечения требуемого значения коэффициента готовности путем управления входными параметрами, например, регулированием периодичности контроля (диагностирования).

Список литературы

1. Боровиков С.М. Цырельчук И.Н., Троян Ф.Д. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств. Минск: БГУИР, 2010. 68 с.

2. ГОСТ 20.911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1990. 12 с.

3. ГОСТ 27.002-15. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 24 с.

4. Дорожко И.В., Копейка А.Л., Захарова Е.А. Имитационная модель для оценивания показателей надежности сложных технических комплексов с учетом показателей контроля и диагностирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. Вып. 10. С. 490 – 498.

5. Дорожко И.В., Кочанов И.А., Осипов Н.А., Бутырин А.В. Комплексная модель надежности и диагностирования сложных технических систем // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. СПб., 2016. № 652. С. 137 – 146.

6. Дьяконов В.П. Simulink5/6/7: Самоучитель. М.: ДМК-Пресс, 2008. 784 с.

7. Технические средства диагностирования: справочник / В.В. Клюев и др. М.: Машиностроение, 1989. 671с.

8. Острейковский В.А. Теория надежности. М.: Высш. шк., 2003. 463 с.

9. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.

10. Stateflow® and Stateflow® Coder™ User's Guide 2017 by The MathWorks, Inc. 896 p.

11. Царегородцев А.В. Электромагнитный терроризм и обеспечение безопасности критически важных объектов // Национальные интересы: приоритеты и безопасность, 2010. 22(79). С. 45 - 53.

Копейка Александр Леонидович, адъюнкт, koppya252@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Дорожко Игорь Владимирович, канд. техн. наук, старший преподаватель, Doroghko-Igor@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Кузнецов Александр Борисович, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры, Doroghko-Igor@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

SIMULATION MODEL THE PROCESS OF CONTROL AUTOMATED PREPARATION AND START SYSTEM IN CONDITION OF DESTABILIZING EXTREMAL FACTORS

A.L. Kopeyka, I.V. Dorozhko, A.B. Kuznetsov

The article presents the simulation model of estimation of the complex indicator of reliability (availability ratio) is presented taking into quality control indicators and diagnosing automated preparation and start system in condition of destabilizing extremal factors, developed with the help of the modeling environment Stateflow software Matlab. Adequacy of the developed simulation model is confirmed by analytical calculations.

Key words: Reliability, the control, diagnosing, availability ratio, reliability, errors, markov process, imitating model, destabilizing extremal factors.

Kopeyka Alexander Leonidovich, adjunct, koppya252@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mojaisky,

Dorozhko Igor Vladimirovich, candidate of technical sciences, senior lecturer, Doroghko-Igor@yandex.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mojaisky,

Kuznetsov Alexander Borisovich, candidate of technical sciences, docent, chief of the Department, Russia, Saint Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mojaisky

УДК 623.9

ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЙ ВЗРЫВА НА МАЛЫЕ ПРЕГРАДЫ В ВОДЕ

Г.Т. Володин, Е.А. Дуденков, Д.С. Кочергин

Найдены соотношения для вычисления импульсных динамических нагрузок, воспринимаемых телом малых размеров произвольной формы, при взрыве в воде заряда конденсированного взрывчатого вещества (ВВ) на глубине вдали от свободной поверхности и дна водоёма. Используемые при этом известные соотношения для давления и удельного импульса позволяют в рамках принятых допущений выполнять расчёты реальных (конечных) элементов конструкций на прочность. В качестве примера приведены результаты расчётов воздействия взрыва сосредоточенного заряда тротила на подводный объект, ограниченный эллипсоидом с заданными размерами.

Ключевые слова: взрыв заряда, малые элементы конструкций, безграничная водная среда, импульсная динамические нагрузка, объект, ограниченный эллипсоидом.

В расчётах действия взрыва на большие (неограниченные) преграды пренебрегают влиянием нагрузок, создаваемых взрывной волной с тыльной стороны преграды.

В расчётах взрывных воздействий на конструкции небольшого (ограниченного) объема следует учитывать фактор воздействия таких нагрузок на тыльную и боковые стороны конструкции, учитывая тем самым эффекты всестороннего сжатия от действия всестороннего давления. Например, если взрыв происходит недалеко от сваи, то в ней возникают сжимающие напряжения от всестороннего давления и напряжения изгиба от равнодействующего импульса. При этом напряжения изгиба будут наибольшими в случае жесткой заделки концов сваи. Кроме того, в случае действия взрыва на малые преграды, удельный импульс, воспринимаемый ими, вследствие дифракции, практически будет равен импульсу от проходящей ударной волны. Это подтверждается опытами, проведенными в ВИА им В.В. Куйбышева в 1948-1949 г. [1, 2].

Физическая модель (основные допущения). Предполагается, что происходит взрыв сосредоточенного заряда конденсированного взрывчатого вещества (ВВ) с заданными характеристиками, определяемыми обобщенным параметром η, на некотором конечном расстоянии r_* от рассматриваемого объекта произвольной формы, находящегося в воде.

Объект находится на достаточной глубине, так что влиянием волн отражения от свободной поверхности и дна водоема можно пренебречь. Объект имеет относительно малые характерные размеры, позволяющие, в силу дифракции ударной волны, рассматривать её воздействие как от проходящей ударной волны, пренебрегая эффектами отражения её от объекта. Объект предполагается абсолютно твердым телом, имеющим произвольную форму. Импульсное воздействие ударной волны происходит в течение времени фазы сжатия, так что последующие «хвостовые» эффекты ударной волны [3] влияют лишь на амплитуду колебаний объекта, полученных от первоначального максимального на него воздействия от волны в фазе сжатия.

Математическая модель. Решение задачи. Пусть в системе координат *xOy* (рис. 1) рассматривается абсолютно твердое тело произвольной формы, ограниченное внешней поверхностью σ. Тело находится в воде вдали от свободной поверхности водоёма и от поверхности дна. На расстоянии r_0 от центра тяжести тела, в точке $C(x_*, y_*, z_*)$ в момент времени $t=0$ происходит взрыв сосредоточенного заряда, характеризующегося обобщенным параметром η [1].

Требуется в рамках принятой физической модели (принятых гипотез) найти максимальную силу и максимальный импульс, полученные телом за время действия ударной волны в режиме фазы сжатия. Эффекты отражения ударной волны от рассматриваемого тела в этой модели не учитываются.

Рассмотрим произвольно выделенный элемент $d\sigma$ на поверхности σ данного тела. Обозначим за $\vec{n} = \{\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma\}$ орт нормального вектора, проведенного из некоторой «средней» точки *M* элемента $d\sigma$, при этом α, β, γ - соответственно углы, образованные вектором $\vec{n}$ с положительными направлениями осей координат *Ox, Oy, Oz*.

Обозначим за $dS \approx dxdy$ (Рис. 2) площадь проекции элемента $d\sigma$ на координатную плоскость *xOy*. Пусть элемент $d\sigma$ расположен на расстоянии *r* от центра взрыва. Тогда согласно [1,2] в точке $M(x, y, z)$ ударная волна создаёт избыточное давление в режиме фазы сжатия

$$p = \frac{\eta}{r}, \qquad (1)$$

где $\eta = q \cdot m^{\frac{1}{3}}$, $q = (p_0 - p_1)\sqrt[3]{\frac{3}{4\pi\rho_*}}$; p_0 - давление мгновенной детонации заряда ВВ; p_1 - давление окружающей заряд среды в момент взрыва; ρ_* - плотность ВВ; *m* – масса заряда ВВ.

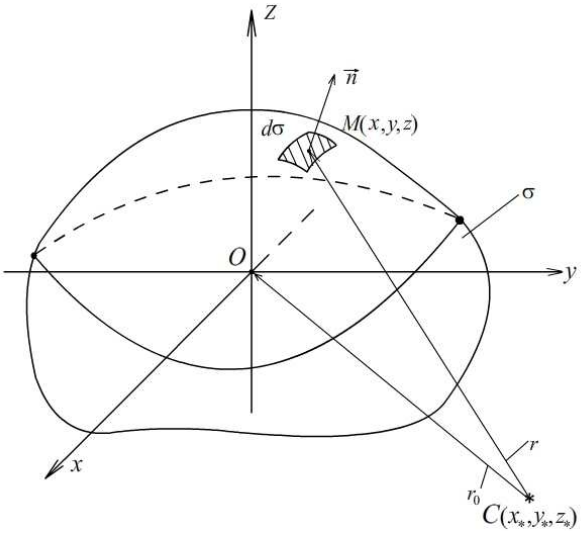


Рис. 1. Схема воздействия взрыва сосредоточенного заряда на тело произвольной формы в воде

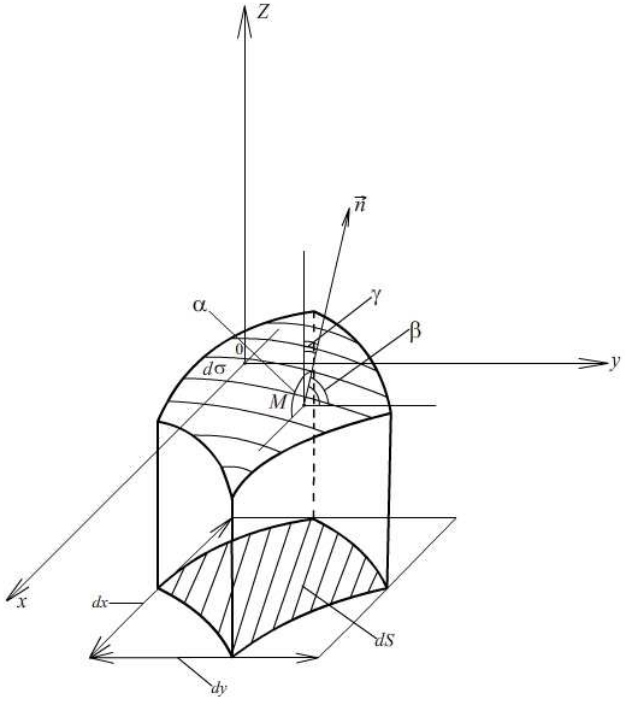


Рис. 2. Схема проекции элемента $d\sigma$ на одну из координатных плоскостей

Элементарная сила, действующая на элемент $d\sigma$ вычисляется в виде

$$d\vec{F} = (p \cdot d\sigma)\vec{n}_1, \tag{2}$$

где $\vec{n}_1 = -\vec{n}$, то есть эта сила направлена внутрь поверхности $d\sigma$, так как действующее давление с внешней поверхности сжимает тело. Вектор результирующей силы вычисляется как поверхностный интеграл, взятый по всей поверхности σ

$$\vec{F} = \iint_{\sigma} (pd\sigma)\vec{n}_1 \tag{3}$$

или, с учётом (1)

$$\vec{F} = \iint_{\sigma} (\frac{\eta}{r} d\sigma)\vec{n}_1 \tag{4}$$

Учитывая, что $r = \sqrt{(x-x_*)^2 + (y-y_*)^2 + (z-z_*)^2}$, получим

$$\vec{F} = \iint_{\sigma} \frac{\eta}{\sqrt{(x-x_*)^2 + (y-y_*)^2 + (z-z_*)^2}} (d\sigma)\cdot\vec{n}. \tag{5}$$

Для нахождения величины и направления силы $\vec{F}$ удобно сначала найти её проекции на координатные оси, затем модуль и направляющие косинусы

Используя формулу (2), получим

$$d\vec{F} = \{-p(d\sigma)\cos\alpha, -p(d\sigma)\cos\beta, -p(d\sigma)\cos\gamma\}. \tag{6}$$

Обозначим

$$\left.\begin{aligned} -p(d\sigma)\cos\alpha &= dF_x \\ -p(d\sigma)\cos\beta &= dF_y \\ -p(d\sigma)\cos\gamma &= dF_z \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

где dF_x, dF_y, dF_z - проекции вектора $d\vec{F}$ на соответствующие оси координат.

Проекции на оси координат силы $\vec{F}$ согласно формуле (5) вычисляются по формулам:

$$\left.\begin{aligned} F_x &= -\iint_{\sigma} \frac{\eta}{\sqrt{(x-x_*)^2 + (y-y_*)^2 + (z-z_*)^2}} (d\sigma)\cos\alpha \\ F_y &= -\iint_{\sigma} \frac{\eta}{\sqrt{(x-x_*)^2 + (y-y_*)^2 + (z-z_*)^2}} (d\sigma)\cos\beta \\ F_z &= -\iint_{\sigma} \frac{\eta}{\sqrt{(x-x_*)^2 + (y-y_*)^2 + (z-z_*)^2}} (d\sigma)\cos\gamma \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

Учитывая, что $(d\sigma)\cdot\cos\alpha = dydz, (d\sigma)\cdot\cos\beta = dxdz, (d\sigma)\cdot\cos\gamma = dxdy$, формулы системы (8) для вычисления при переходе от поверхностных интегралов второго рода к двойным интегралам запишем в виде

$$\left.\begin{aligned} F_x &= -\iint_{D_{zy}} \frac{\eta dydz}{\sqrt{(x-x_*)^2 + (y-y_*)^2 + (z-z_*)^2}} \\ F_y &= -\iint_{D_{xz}} \frac{\eta dxdz}{\sqrt{(x-x_*)^2 + (y-y_*)^2 + (z-z_*)^2}} \\ F_z &= -\iint_{D_{xy}} \frac{\eta dxdy}{\sqrt{(x-x_*)^2 + (y-y_*)^2 + (z-z_*)^2}} \end{aligned}\right\}, \tag{9}$$

где D_{xy}, D_{xz}, D_{zy} - проекции тела на соответствующие координатные плоскости *xOy*, *xOz*, *zOy*.

При этом соответствующая проекция силы при вычислении двойного интеграла берется со своим знаком (формулы (9)), если угол между нормалью $\vec{n}$ и положительным направлением соответствующей координатной оси острый и с противоположным знаком, если этот угол тупой.

Направляющие косинусы вектора искомой силы $\vec{F}$ определяются по формулам:

$$\left.\begin{aligned}\cos\alpha_1 &= \frac{F_x}{\sqrt{F_x^2+F_y^2+F_z^2}}\\ \cos\beta_1 &= \frac{F_y}{\sqrt{F_x^2+F_y^2+F_z^2}}\\ \cos\gamma_1 &= \frac{F_z}{\sqrt{F_x^2+F_y^2+F_z^2}}\end{aligned}\right\}, \tag{10}$$

где $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ – углы вектора силы $\vec{F}$ с положительными направлениями соответствующих осей координат.

Направляющие косинусы нормали $\vec{n}$ вычисляются по формулам

$$\cos\alpha = \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \cos\beta = \frac{\partial \Phi}{\partial y}, \cos\gamma = \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \tag{11}$$

где

$$\Phi(x, y, z) = 0 \tag{12}$$

представляет собой уравнение поверхности σ.

В качестве примера рассмотрим нахождение результирующей силы $\vec{F}$ от действия взрыва сосредоточенного заряда ВВ на объект в виде тела, ограниченного эллипсоидом:

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}+\frac{z^2}{c^2}=1 \tag{13}$$

В этом случае

$$\Phi(x, y, z) = \frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}+\frac{z^2}{c^2}-1;$$

$$\vec{n} = \{\frac{2x}{a^2}; \frac{2y}{b^2}; \frac{2z}{c^2}\};$$

$$D_{xy} \Rightarrow \frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1; D_{yz} \Rightarrow \frac{y^2}{b^2}+\frac{z^2}{c^2}=1; D_{xz} \Rightarrow \frac{x^2}{a^2}+\frac{z^2}{c^2}=1$$

Рассмотрим нахождение компоненты силы F_z. Согласно третьей формуле соотношений (9), имеем

$$F_z = -\iint\limits_{D_{xy}} \frac{\eta dxdy}{\sqrt{(x-x_*)^2+(y-y_*)^2+(z-z_*)^2}},$$

при этом

$$z = \pm c\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}},$$

где знак «минус» соответствует нижней стороне поверхности эллипсоида $\cos\gamma < 0$, а знак «плюс» верхней стороне поверхности $\cos\gamma > 0$.

Результаты вычислений для заданных параметров, определяющих характеристики заряда ВВ, его расположение по отношению к объекту в виде тела, ограниченного эллипсоидом с заданными размерами, представлены в таблице.

Обозначим

$$F_{z1} = -\iint\limits_{D_{xy}} \frac{\eta dxdy}{\sqrt{(x-x_*)^2+(y-y_*)^2+(c\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}}-z_*)^2}},$$

что соответствует $\cos\gamma > 0$, и

$$F_{z2} = -\iint\limits_{D_{xy}} \frac{\eta dxdy}{\sqrt{(x-x_*)^2+(y-y_*)^2+(c\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}}+z_*)^2}},$$

что соответствует $\cos\gamma < 0$.

Тогда $F_z = F_{z1} + F_{z2}$. Аналогично представлены компоненты F_y и F_x.

Для вычисления компонентов силы рассмотрим следующие соотношения:

$$\vec{F} = pd\sigma \cdot \vec{n_1}; \quad \vec{n} = \{\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma\};$$

$$\vec{n_1} = -n\{-\cos\alpha, -\cos\beta, -\cos\gamma\}; \; d\vec{F} = \{dF_x, dF_y, dF_z\};$$

$$dF_x = pd\sigma(-\cos\alpha)$$

$$dF_y = pd\sigma(-\cos\beta);$$

$$dF_z = pd\sigma(-\cos\gamma)$$

$$\vec{F} = \iint\limits_{\sigma} pd\sigma\vec{n_1} = \iint\limits_{\sigma}[(dF_x)\vec{i}+(dF_y)\vec{j}+(dF_z)\vec{k}] = \iint\limits_{\sigma}(dF_x)\vec{i} + \iint\limits_{\sigma}(dF_y)\vec{j} + \iint\limits_{\sigma}(dF_z)\vec{k};$$

$$\iint\limits_{\sigma} dF_x = -\iint\limits_{\sigma} pd\sigma\cos\alpha = -\iint\limits_{\sigma} pdydz.$$

Аналогично,

$$\iint\limits_{\sigma} dF_y = -\iint\limits_{\sigma} pd\sigma\cos\beta = -\iint\limits_{\sigma} pdzdx$$

$$\iint\limits_{\sigma} dF_z = -\iint\limits_{\sigma} pd\sigma\cos\gamma = -\iint\limits_{\sigma} pdxdy$$

Найдём, например,

$$\iint\limits_{\sigma} pdxdy = \iint\limits_{\sigma_1} pdxdy + \iint\limits_{\sigma_2} pdxdy,$$

где $\sigma_1 : \frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}+\frac{z^2}{c^2}=1,\ z<0,\ z=\pm c\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}}$;

$$\iint\limits_{\sigma_1} p dxdy = -\iint\limits_{D_{xy}} \frac{\eta dxdy}{\sqrt{(x-x_*)^2+(y-y_*)^2+(c\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}}+z_*)^2}} =$$

$$= -\int_{-a}^{a} dx \int_{-\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}}^{\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}} \frac{\eta dy}{\sqrt{(x-x_*)^2+(y-y_*)^2+(c\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}}+z_*)^2}};$$

$\iint\limits_{\sigma_2} p dxdy$, где $\sigma_2 : \frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}+\frac{z^2}{c^2}=1,\ z\geq 0,\ z=c\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}}$;

$$\iint\limits_{\sigma_2} p dxdy = \iint\limits_{D_{xy}} \frac{\eta dxdy}{\sqrt{(x-x_*)^2+(y-y_*)^2+(c\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}}-z_*)^2}} =$$

$$= -\int_{-a}^{a} dx \int_{-\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}}^{\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}} \frac{\eta dy}{\sqrt{(x-x_*)^2+(y-y_*)^2+(c\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}}-z_*)^2}}.$$

Далее, в соответствии с $\iint\limits_{\sigma} dF_z = -\iint\limits_{\sigma} p dxdy$ меняем знаки у полученных двойных интегралов. Таким образом, получим

$$F_z = \iint\limits_{\sigma} dF_z = -\iint\limits_{\sigma} p dxdy = -\iint\limits_{\sigma_1} p dxdy - \iint\limits_{\sigma_2} p dxdy \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_z = \int_{-a}^{a} dx \int_{-\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}}^{\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}} \frac{\eta dy}{\sqrt{(x-x_*)^2+(y-y_*)^2+(c\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}}+z_*)^2}} -$$

$$- \int_{-a}^{a} dx \int_{-\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}}^{\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}} \frac{\eta dy}{\sqrt{(x-x_*)^2+(y-y_*)^2+(c\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}}-z_*)^2}}.$$

Представленные таким образом двойные интегралы вычисляются численно.

Таблица результатов вычислений

F_x, [Н]	F_y, [Н]	F_z, [Н]	$\lvert F\rvert$, [Н]	$cos\alpha_1$, [рад]	$cos\beta_1$, [рад]	$cos\gamma_1$, [рад]	x_*, [м]	y_*, [м]	z_*, [м]
$-1{,}204 \cdot 10^9$	$-1{,}256 \cdot 10^9$	$-1{,}243 \cdot 10^9$	$2{,}138 \cdot 10^9$	-0,563	-0,587	-0,581	20	20	20

Результаты вычислений соответствуют следующим числовым данным параметров: $m=20$кг, $\rho_*=1590$кг/м^3, $p_0=1{,}77\cdot 10^{10}$Па, $p_1=2\cdot 10^6$Па, $a=10$м, $b=4$м, $c=6$м, $x_*=20$м, $y_*=20$м, $z_*=20$м.

Таким образом получены характеристики максимальной результирующей силы, действующей на объект, ограниченный эллипсоидом, в воде при взрыве сосредоточенного заряда тротила заданной массы на заданном расстоянии до объекта. Результаты полученных исследований могут быть использованы при расчётах на прочность и устойчивость конструкций при действии на них в воде взрывных нагрузок.

Список литературы

1. Коул Р.Г. Подводные взрывы. М.: ИЛ, 1950. 495 с.

2. Власов О.Е. Основы теории действия взрыва. М.: Издотельство ВИА, 1959. 407 с.

3. Замышляев Б.В., Яковлев Ю.С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. Л.: Судостроение, 1967. 194 с.

4. Перцев А.К., Кадыров С.Г. Воздействие подводного взрыва на элементы корабля. СПб.: СПбГМТУ, 2009. 321 с.

5. Кормилицын Ю.Н., Мельников С.Ю., Томашовский В.Т. Подводный взрыв и его взаимодействие со средами и преградами. СПб.: Наука, 2006. 242 с.

Володин Геннадий Тимофеевич, д-р техн. наук, профессор, g.volodin@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Дуденков Егор Андреевич, студент, dudenkove@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Кочергин Денис Сергеевич, аспирант, sir.cod4@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

EFFECTS OF EXPLOSION EFFECTS ON SMALL OBSTACLES IN WATER

G.T. Volodin, E.A. Dudenkov, D.S. Kochergin

Relations are found for calculating the pulse dynamic loads perceived by a small body of arbitrary shape when a charge of condensed explosive (BB) explodes in water at a depth far from the free surface and bottom of the reservoir. The known ratios for pressure and specific impulse used in this case allow us to perform calculations of real (final) structural elements for strength within the framework of accepted assumptions.

Key words: charge explosion, small structural elements, boundless water environment, dynamic loads, impulse.

Volodin Gennady Timofeyevich, doctor of technical sciences, professor of department Computing mechanics and mathematician, g.volodin@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Dudenkov Egor Andreevich, student, dudenkove@gmail.com, Russia, Tula State University,

Kochergin Denis Sergeyevich, postgraduate, sir.cod4@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 519.8

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ТИПОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ

О.В. Есиков, Д.В. Ёркин, Ю.В. Чебурков, А.В. Кулешов

Предложена методика описания и анализа типовых функциональных задач (ФЗ) органов управления пространственно-распределённых информационных объектов. Определены численные оценки близости функциональных задач по составу процедур и информационных элементов, позволяющих сформулировать задачу кластер-анализа. В качестве критерия выбран минимум суммы средних «расстояний» между функциональными задачами. Предложена методика выделения типовых расчетных и информационных процедур. Приведен алгоритм разбиения множества функциональных задач на классы общности.

Ключевые слова: информационный объект, граф, функциональная задача, методика, модель.

Функциональные задачи, решаемые органами управления пространственно-распределённых информационных объектов, определяются путем установления соответствия между вариантами функционирования органов управления и выполняемыми ими функциями [1].

Множество процедур обработки данных, выполняемых органами управления при реализации *n*-й задачи определяется как

$$F_n = \left\{ f_{nj}^{Kn},\ j = \overline{1, Q^{Kn}} \right\},$$

где Q^{Kn} – количество вариантов реализации *n*-й процедуры обработки данных, $n = \overline{1, N}$, N –общее число решаемых задач.

Данные, полученные в результате типизации (типовые и специфические расчетные и информационные процедуры и их характеристики), являются исходными для синтеза адаптивного специального математического и программного обеспечения автоматизированных систем управления.

Под типовой процедурой формирования выходной информации понимается процедура, используемая при решении всего множества функциональных задач более одного раза и характеризующаяся при этом общностью входной информации, а также единым порядком и правилами их формирования (обработки).

Процедуры, не являющиеся типовыми, относятся к классу специфических и применяются только при решении специальных задач.

Исходными данными для выделения типовых и специфических процедур являются результаты анализа информационных моделей решения функциональных задач, представленные в виде графических схем обмена информацией и перечня процедур по ее обработке (переработке).

Методика выделения типовых расчетных и информационных процедур включает два этапа.

На первом этапе производится разбиение множества F на подмножества F_k, $k=\overline{1,K}$ функциональных, характеризующихся необходимой для выделения типовых процедур общностью. Данное разбиение проводится на уровне детализации задач до блоков переработки информации.

Последовательность действий при этом следующая:

- путем выделения из каждой рассматриваемой информационной модели всех блоков переработки информации и связей между ними формируются укрупненные алгоритмы решения функциональных задач, которые, для удобства, представляются в виде сетевых графов;

- путем наложения сетевых графов решения задач формируется интегрированный сетевой граф решения всего множества задач;

- определяется степень общности рассматриваемых задач относительно блоков переработки информации. Для этого каждой паре (f_p, f_q) элементов множества F ставится в соответствие показатель Жаккарда[2,3].

$$\zeta = P_{11}/(P_{11}+P_{10}+P_{01}), \qquad (1)$$

где P_{11} - количество общих элементов (процедур обработки данных или информационных элементов) для функциональных задач f_p, f_q;P_{10}, P_{01} - соответственно количество элементов, присутствующих в f_p и отсутствующих в f_q, и наоборот.

Для определения степени близости задач $f_n \in F$ по составу используемых в них блоков переработки информации строится матрица M размерности 3×3, элементами которой являются показатели подобия $z(f_p,f_q)$, $p,q=\overline{1,3}$, рассчитанные по формуле (1).

Полученные численные оценки близости задач по составу используемых блоков переработки информации являются исходными данными для решения задачи кластер-анализа. По критерию минимума суммы средних «расстояний» между функциональными задачами, относимыми в один и тот же класс, постановка задачи имеет следующий вид [1]:

определить множество классов общности из условия

$$\min_{\zeta_{kp}} \sum_{k=1}^{K(\zeta_{kp})} \left(\frac{1}{Y^k} \sum_{\substack{f_p, f_q \in F^k, \\ p \neq q}} \nu(f_p, f_q)\right) \qquad (2)$$

при ограничениях

$$\sum_{k=1}^{K} \left|F^k\right| = N; \qquad (3)$$

$$\zeta_{kp} \geq 0.23, \qquad (4)$$

где Y^k - количество взаимосвязей между элементами подмножества F^k, $k=\overline{1,K}$; K–число разбиений множества F;N –общее число решаемых задач; f_n– n-яфункциональная задача, $n=\overline{1,N}$; ζ_{kp} - параметр процедурной связности графа технологии ФЗ; $\nu(f_p, f_q)$ - функция расстояния между p-й и q-й функциональными задачами.

Задача (2) - (4) является задачей численной классификации [4,5]. В качестве базовой модели для ее решения предлагается модель, основанная на гибкой стратегии.

На втором этапе осуществляется выделение из каждого подмножества F^k типовых процедур в следующей последовательности:

каждому блоку переработки информации укрупненного алгоритма решения задач присваивается числовой код k_1, соответствующий порядку использования блоков переработки информации в интегрированном сетевом графе;

каждой процедуре в рамках блока переработки информации присваивается числовой код $k_1.k_2$, при этом показатель k_2 соответствует порядку использования процедуры в блоках переработки информации (с учетом всего множества задач планирования огневого поражения противника, в которых данный блок переработки информации используется);

в результате последовательного сопоставления каждой очередной процедуры с рассмотренными ранее на предмет их общности относительно входной информации и порядка ее обработки (переработки) каждой процедуре присваивается числовой код $k_1.k_2.k_3$, при этом показатель k_3 соответствует общему порядковому номеру типовой (специфической) процедуры, используемой при решении задач планирования огневого поражения противника из подмножества F^k, $k=\overline{1,K}$;

в результате анализа подмножеств процедур с равными значениями показателя k_3 по значениям числовых кодов k_1 и k_2 устанавливается порядок формирования типовых (специфических) процедур - в каких задачах, блоках переработки информации данная процедура используется. При этом на каждом подмножестве процедур с равным значением показателя k_3 строится типовая (специфическая) процедура, учитывающая особенности всех задач и блоков переработки информации, в которых она используется. Кроме того, каждой процедуре $a_i \in A$ ставится в соответствие величина t_i, называемая "толщиной" процедуры на множестве F задач и определяемая зависимостью (5).

$$t_i = \sum_{n=1}^{N} m_{in}{}^2, \; i=\overline{1,I}. \tag{5}$$

Элементы матрицы $M^2=\{m_{in}{}^2, \; i=\overline{1,I}, n=\overline{1,N}\}$ определяются следующим образом:

$m_{in}{}^2=1$, если i-тая процедура обработки данных используется при решении функциональной задачи f_n; $m_{in}{}^2=0$ - в противном случае.

«Толщина» процедуры t_i характеризует мощность множества задач, в которых используется i-тая процедура формирования выходных данных. Процедуры с весом $t_i>1$ являются типовыми, остальные - специфическими.

Для каждой задачи f_n, $n=\overline{1,N}$ определяется средняя процедурная «толщина» t_n в соответствии с (6).

$$\bar{t}_n = \frac{1}{I_n} \sum_{i \in U_n} t_i, \tag{6}$$

где I_n – число процедур обработки данных в n-й функциональной задаче, U_n – число информационных элементов, используемых n-й функциональной задачей.

Значения рассчитанных величин t_i и t_n, а также интегрированный граф решения задач, порядок формирования типовых процедур используются на этапе синтеза специального математического и программного обеспечения и определения очередности его разработки.

Пусть имеются два класса общности F^l и F^m; мера различия между этими классами обозначается ν_{lm}. Допустим, что ν_{lm}– минимальная мера из всех оставшихся, так что классы F^l и F^m объединяются и образуют новый класс F^k. Рассмотрим некоторый другой класс общности F^h. Перед объединением известны значения ν_{hl}, ν_{hm}, ν_{lm}. Необходимо найти значение ν_{hk}. Положим

$$\nu_{hk}= \alpha_l\nu_{hl}+ \alpha_m\nu_{hm}+ \beta\nu_{lm}+ \gamma|\nu_{hl}- \nu_{hm}|,$$

где параметры α_l, α_m, β и γ определяют сущность стратегии.

Анализ различных подходов к агломерации множества функциональных задач позволили сделать вывод о целесообразности использования гибкой стратегии [3,4], которая определяется четырьмя ограничениями:

$$\alpha_l+ \alpha_m+ \beta=1,\ \alpha_l= \alpha_m,\ \beta<1,\ \gamma=0.$$

На практике обычно используются значения $\alpha_l= \alpha_m=0{,}625$, $\beta=-0{,}25$.

Алгоритм разбиения множества функциональных задач на классы общности состоит из следующих операций:

1. Вводятся данные о количестве и характеристиках функциональных задач.

2. Каждая функциональная задача $f_n, n=\overline{1,N}$ рассматривается как отдельный класс и вычисляется начальная матрица межклассовых расстояний D:

$$D_{pq}= \nu(f_p,f_q)= 1-\xi(f_p,f_q),\ \ p,q=\overline{1,N}\,, \qquad (7)$$

где $\xi(f_p,f_q)$ рассчитывается через показатель Жаккарда [2,3] (1). Количество классов общности принимается равным N, $k=N$.

3. Просматривается матрица D и находится минимальный элемент D_{lm}.

4. Если $D_{lm}>1-\xi_{кр}$, то переход к шагу 8.

5. Объединяются два класса F^l и F^m,определенные на шаге 2, образуя новый класс F^k, где$k=k+1$. Печатается информация, относящаяся к этому объединению (количество классов, содержание классов, характеристики классов).

6. Если остается только один класс, то переход к шагу 8.

7. Вычисляются новые “расстояния” $D_{hk}=\nu_{hk}$ между новым классом F^k и каждым из оставшихся классов F^h по зависимости (7). Переход к шагу 2.

8. Выводятся результаты решения задачи.

Полученные совокупности типовых и специфических процедур обработки информации и их характеристики позволяют перейти к решению задачи синтеза адаптивного специального математического и программного обеспечения – формированию унифицированных расчетных и информа-

ционных модулей, которые в зависимости от содержания и степени определенности исходной информации в той или иной последовательности могут использоваться при решении функциональных задач в АСУ различного назначения.

Список литературы

1. Есиков О.В., Кулешов А.В., Чебурков Ю.В. Математическая модель и методика анализа функциональных задач органов управления пространственно-распределенных информационных объектов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2019. Вып. 2. С. 255-262.

2. Moulton Ryan, Jiang Yunjiang. Maximally Consistent Sampling and the Jaccard Index of Probability Distributions // International Conference on Data Mining. Workshop on High Dimensional Data Mining, 2018.

3. Qian Huihuan, Wu Xinyu, Xu Yangsheng. Intelligent Surveillance Systems. Springer. 2011. 161 p.

4. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. An Introduction to Statistical Learning with Applications in R. Springer, 2013.

5. Зенков А.В. Численные методы: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2016. 124 с.

Есиков Олег Витальевич, д-р техн. наук, профессор, главный специалист, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тула, АО Центральное конструкторское бюро аппаратостроения,

Чебурков Юрий Викторович, преподаватель, niriopaii@mail.ru, Россия, Пенза, Филиала Военной академии материально-технического обеспечения,

Еркин Денис Васильевич, адъюнкт, cdbae@cdbae.ru, Россия, Пенза, Пензенский филиал Военной академии МТО им. генерала армии А.В. Хрулева,

Кулешов Андрей Владимирович, главный конструктор, Kuleshov83@yandex.ru, Россия, Москва, АО «Хоневелл»

METHOD OF ANALYSIS OF TYPICAL FUNCTIONAL CONTROLS OF SPATIALLY DISTRIBUTED INFORMATION OBJECTS

O.V. Esikov, D.V. Erkin, Y.V. Cheburkov, A.V. Kuleshov

The method of description and analysis of typical functional tasks (FZ) of management bodies of spatially distributed information objects is proposed. Numerical estimates of the proximity of functional tasks by the composition of procedures and information elements that allow us to formulate a cluster analysis problem are determined. The minimum sum of the average «distances» between functional tasks is selected as a criterion. A method for identifying typical calculation and information procedures is proposed. An algorithm for dividing a set of functional problems into generality classes is given.

Key words: information object, graph, functional problem, method, model.

Esikov Oleg Vitalievich, doctor of technical sciences, professor, chief specialist, cdbae@cdbae.ru, Russia, Tula, JSC Central Design Bureau of Apparatus Engineering,

Cheburkov Yuri Viktorovich, lecturer, niriopaii@mail.ru, Russia, Penza, Branch of the Military Academy of Logistics,

Erkin Denis Vasilievich, adjunct, cdbae@cdbae.ru, Russia, Penza, Penza branch of the Military Academy of the MTO named after Army General A.V. Khruleva,

Kuleshov Andrey Vladimirovich, chief designer, Kuleshov83@yandex.ru, Russia, Moscow, JSC Honewell

УДК 621.317

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ НА РАЗРАБОТКУ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СРЕДСТВ СВЯЗИ

А.В. Морозов, А.А. Самохвалов, А.А. Устинов

В статье представлена математическая модель процесса технической эксплуатации средств связи. Предложенная модель позволяет получить вероятностно-временные характеристики функционирования средств связи при их использовании по назначению.

Ключевые слова: средства связи, модель, обеспеченность, оценка, коэффициент готовности.

Модель предназначена для получения вероятностно-временных характеристик (ВВХ) функционирования средств связи при их использовании по назначению; проигрывания возможных ситуаций и принятия решений по выбору методов и способов обеспечения требуемой технической готовности средств связи к использованию по назначению; оценки степени выполнения системой технического обслуживания и ремонта (ТехО и Р) требований по обеспечению технической готовности средств связи к использованию по назначению и в целом обеспечения задания требований к системе обеспечения готовности.

Управляемыми параметрами в модели являются:

период проведения контроля технического состояния средств связи;

вероятность ошибки 1-го рода при контроле технического состояния;

вероятность ошибки 2-го рода при контроле технического состояния;

среднее время ремонта;

время контроля технического состояния средств связи.

Задача моделирования решалась относительно каналообразующих средств связи как системы передачи первичной сети связи (СП ПСС). В качестве критерия отказа СП ПСС принят отказ средства связи, входящего в ее состав.

Восстановление СП ПСС рассматривается на оперативно-техническом и техническом уровнях.

Техническая эксплуатация техники связи и автоматизированных систем управления (ТС и АСУ) является составной частью технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления (ТОС и АСУ) и влияет на постоянную готовность ТС и АСУ к использованию по назначению. К эксплуатации относится стадия жизненного цикла ТС и АСУ с момента ее принятия воинской частью до списания, которая подразделяется на следующие этапы: ввод в эксплуатацию, приведение в установленную степень готовности к использованию, использование по назначению, хранение, транспортирование и поддержание в готовности к использованию по назначению. Техническая эксплуатация включает в себя комплекс работ по сбережению, поддержанию в работоспособном (исправном) состоянии, восстановлению работоспособности и ресурса техники связи и АСУ [1, 2].

Целесообразно подробно рассмотреть содержание каждого этапа для адекватного моделирования технической эксплуатации средств связи.

Транспортирование – этап эксплуатации, включающий подготовку и перевозку или перемещение изделия военной техники в заданных условиях с использованием транспортных или буксировочных средств при обеспечении сохраняемости его технического состояния и комплектности. Перемещение изделия с одного места его расположения в другое без использования собственного двигателя осуществляется, как правило, его перевозкой на каком-либо транспортном средстве или буксировкой. Если рассматривать средства связи как комплексные образцы, то возникновение необходимости транспортирования связано с надежностью двигателей и шасси автомобилей. Исследование надежностных характеристик двигателей и шасси автомобилей не входит в круг проводимых исследований. Поэтому в дальнейшем средства связи будут рассматриваться отдельно от автомобильной техники. Этот этап чаще всего будет иметь место при совершении марша в назначенный район и занимать незначительную часть от времени нахождения средства связи на других этапах технической эксплуатации. Основываясь на вышесказанном, в дальнейшем этап транспортирования целесообразно вынести за рамки рассматриваемой модели.

Приведение в установленную степень готовности к использованию – это этап, включающий комплекс установленных в документации по эксплуатации работ по приведению изделия военной техники в исходное для последующих действий положение. Приведение в готовность предусматривает следующие мероприятия: заправку топливом, маслом и т.п.; внешний осмотр всего средства связи; осмотр рабочих мест; осмотр и проверку готовности средств связи к использованию; проверку установки органов управления и настройки после подготовки средства связи к работе и перед

включением; проверку ориентирования антенн; проверку взаимосвязи данного средства с другими; проверку средства в работе, в том числе с помощью средств измерений, входящих в состав средства связи; проверку показаний средств измерений, соответствующих установленным режимам работы и допустимых отклонений от этих значений; действия по устранению (если это возможно) неисправностей [3]. Приведение в установленную степень готовности к использованию по назначению всегда предшествует этапам использования по назначению, хранения и поддержания в установленной степени готовности к применению. На данном этапе, по существу, выполняются работы по подготовке средств связи для последующего нахождения этих средств связи на этапах использования по назначению, хранения и поддержания в установленной степени готовности к применению по назначению. В дальнейшем условимся, что этап приведения в установленную степень готовности к использованию по назначению будет входить в содержание следующего за ним этапа технической эксплуатации и как отдельный этап технической эксплуатации рассматриваться не будет.

Хранение – это, согласно [1], этап эксплуатации, при котором используемое по назначению изделие военной техники содержится в специально отведенном для его размещения месте в заданном состоянии и его сохраняемость обеспечивается в течение отведенных сроков. При рассмотрении этапа хранения ограничимся только кратковременным хранением (продолжительностью до одного года), так как при длительном хранении техника не применяется по назначению.

На кратковременном хранении (КХ) содержится ТС и АСУ текущего обеспечения, временно не используемая по назначению. Техника, смонтированная на средствах подвижности, хранится в парках части со свернутыми антеннами, с уложенным и закрепленным имуществом и принадлежностями.

При нахождении ТС и АСУ на КХ техническое обслуживание (ТехО) проводится в объеме ТО-1 и ТО-2.

Условимся, что под хранением будет пониматься только непосредственное нахождение средства связи на хранении, а мероприятия, связанные с выполнением работ по поддержанию готовности при хранении (ТехО и Р), отнесем к этапу поддержания в установленной степени готовности к использованию по назначению.

Использование по назначению – этап эксплуатации, в течение которого изделие военной техники работает в соответствии с его функциональным предназначением [1]. Содержание данного этапа включает в себя: использование средства связи в основных режимах работы и перевод его из одного режима в другой; приведение средства связи в исходное положение; выключение; осмотр после окончания работы.

Условимся, что под использованием по назначению будет пониматься только непосредственное применение средства связи, а мероприятия, связанные с выполнением работ по поддержанию готовности при применении (ТехО и Р), отнесем к этапу поддержания в установленной

степени готовности к использованию по назначению. В дальнейшем проведение технического обслуживания и ремонта при применении будет рассматриваться в составе одного общего (для хранения и применения) этапа эксплуатации – поддержания в готовности к применению.

Поддержание в готовности - этап, в течение которого осуществляется комплекс работ, установленных в нормативно-технической документации (НТД) и направленных на поддержание изделия военной техники в установленной степени готовности. Работы по поддержанию готовности к применению проводятся на всех этапах технической эксплуатации. Этап поддержания в готовности включает комплекс работ по: сбережению, поддержанию в работоспособном (исправном) состоянии, восстановлению работоспособности и ресурса [2]. Из вышеперечисленных мероприятий с учетом направленности проводимого исследования для простоты описания целесообразно выделить два - техническое обслуживание и ремонт.

Техническая готовность средств связи обеспечивается системой эксплуатации (СЭ). По характеру функционирования СЭ относится к стохастическим сетям массового обслуживания (СеМО). СеМО - замкнутая сеть. Входным потоком в такую сеть являются *N* средств связи, рассматриваемых в СЭ. Такая сеть содержит элементы замкнутых и разомкнутых стохастических сетей и систем массового обслуживания.

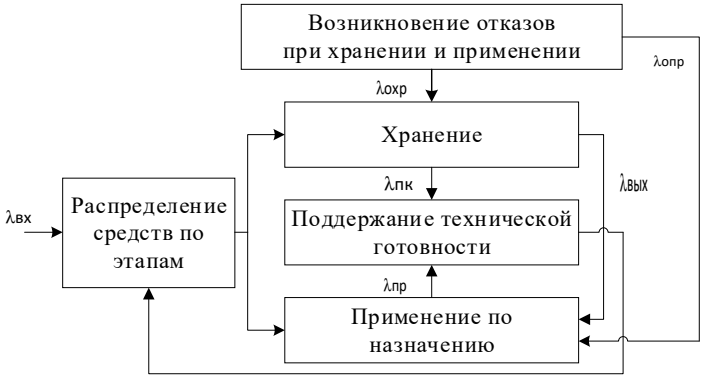


Рис. 1. Система эксплуатации, представленная СеМО

СЭ, описываемая СеМО (рис. 1), состоит из систем массового обслуживания, описывающих возникновение отказов на этапах хранения и применения; сетей массового обслуживания, описывающих процесс нахождения средств связи на этапах хранения и применения; сетей массового обслуживания, описывающих проведение работ по техническому обслуживанию и ремонту (по поддержанию технической готовности к использованию по назначению).

Учитывая сложность алгоритмов функционирования и структуры СЭ, в качестве математического метода при моделировании выбран метод статистических испытаний. Основной задачей моделирования является учет наиболее важных ВВХ средств связи, находящихся в СЭ.

Модель описана на языке моделирования дискретных систем GPSS PC следующими элементами:

1. Статистическими элементами, имитирующими нахождение средств связи на этапах технической эксплуатации:

1.1. Функционирование средств связи на этапах кратковременного хранения и применения описываются как однофазные многоканальные СеМО, обслуживающие заявки без приоритетов. Поэтому эти СеМО представляются устройствами для моделируемой СЭ с интенсивностями обслуживания μ_i и μ_j. Причем СеМО, описывающая этап применения, имеет поток потерянных заявок с интенсивностью $\lambda_{вх}$. Под потерянной заявкой при применении подразумевается снятие средства связи с применения по причине его неработоспособности. СеМО хранения также имеет поток потерянных заявок с интенсивностью $\lambda_{пр}$, который, в свою очередь, входит в состав входного потока заявок на СеМО поддержания готовности с интенсивностью $\lambda_{вх}$. В качестве потока потерянных заявок при проведении технического обслуживания рассматривается отправка в ремонт средств связи из-за выявленной при проведении ТехО неработоспособности.

1.2. Функционирование средств связи на этапе поддержания технической готовности описывается двумя СеМО: сетью технического обслуживания и сетью ремонта (рис. 2). Данные СеМО являются разомкнутыми, бесприоритетными, многоканальными.

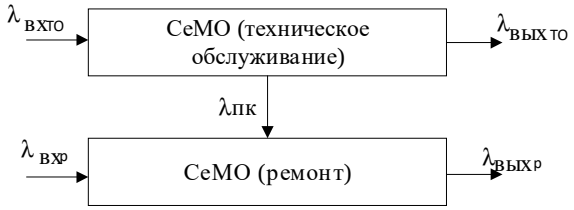


Рис. 2. Этапы технического обслуживания и ремонта как СеМО

2. Динамическими элементами - средствами связи (транзактами), которые находятся в СЭ.

3. Статистическими элементами-очередями и таблицами. Очереди организуются перед сетями технического обслуживания и ремонта и используются при оценке эффективности функционирования системы технического обслуживания и ремонта.

В таблицах организуется сбор статистики о времени пребывания средств связи на этапах технической эксплуатации.

Отличительные особенности предлагаемой модели следующие: рассматривается только техника текущего обеспечения; моделируются функционирование и отказы средств связи на основных этапах технической эксплуатации (поддержание в готовности, использование по назначению и кратковременное хранение); поток отказов моделируется с учетом этапов технической эксплуатации, т.е. параметр потока отказов для каждого средства связи изменяется в зависимости от условий технической эксплуатации, создаваемый поток отказов определяется как поток с учетом условий технической эксплуатации. Особенностью рассмотрения функционирования этапа поддержания готовности является то, что в нем учтены возможные при проведении контроля ТехО ошибки 1-го и 2-го рода.

Ограничения модели таковы: не учитывается расход ресурса элементов средств связи; учитывается только текущий ремонт; количество ЗИП, ремкомплектов и технологического оборудования достаточно для проведения ТехО и Р; квалификация личного состава достаточна для проведения работ по ТехО и Р.

Допущением является то, что в модели учитываются только одиночные отказы, приведшие в неработоспособное состояние средства связи, так как средство связи считается неработоспособным при возникновении хотя бы одного отказа.

Исходными данными для модели являются: множество средств связи, время моделирования, коэффициент хранения ($K_{хр}$), средняя наработка на отказ и ее распределение для каждого средства связи, периодичность и время проведения ТехО, запланированная очередность поступления и времена пребывания объекта на этапах применения по назначению и хранению, вероятности возможного запроса для внепланового применения средства связи, среднее время восстановления средства связи и его распределение, вероятности возникновения ошибок первого и второго рода при контроле технического состояния при проведении ТехО; количество мастеров–ремонтников. Предполагается, что в начале моделирования средство связи может быть неработоспособным, что также является исходными данными.

Выходными результатами являются: времена нахождения рассматриваемых объектов на этапах эксплуатации, по которым можно рассчитать их коэффициент готовности ($K_{г}$), коэффициент оперативной готовности ($K_{ог}$) и коэффициент технического использования ($K_{ти}$).

Одним из вопросов, который требуется решить при моделировании потока отказов, является выбор математической модели для его описания. От того, насколько правильно выбрана модель, зависят сложность обработки, достоверность и точность полученных результатов. Вопрос о выборе математической модели для описания потока отказов решается на основе исследования основных свойств реального потока: стационарности, ординарности и последействия.

Требование ординарности означает практическую невозможность возникновения двух и более отказов одновременно. Поэтому причинами нарушения ординарности в реальных потоках являются в основном зависимые отказы, возникновение которых является следствием ранее возникших отказов. Практика исследования потоков отказов показала, что неординарность незначительно влияет на структуру потока и этим влиянием без большого ущерба можно пренебречь [8]. То есть в дальнейшем интерес представляет факт возникновения хотя бы одного отказа, при котором средство связи будет считаться неработоспособным.

Существующие модели отказов [4 - 7], возникающих на различных этапах технической эксплуатации, не учитывают условий технической эксплуатации. Известно, что на каждом этапе технической эксплуатации

отказы имеют разную интенсивность возникновения. Допустим, этап применения сменяется хранением и, если при применении отказ не произошел, то это может отразиться на времени возникновения отказа при хранении.

На рис. 3 приведен пример такого перехода. Допустим, при применении закон распределения отказов является экспоненциальным и характеризуется кривой 3. В момент времени t_1 применение прекращается и начинается этап хранения, при котором отказы возникают также по экспоненциальному закону (характеризуется кривой 1), но с меньшей интенсивностью. Вероятность возникновения отказов при применении определяется выражением

$$P = e^{\frac{-t_2}{T_0}}, \qquad (1)$$

где t_2 – время наступления отказа, если средство связи только применялось; T_0– средняя наработка на отказ при применении.

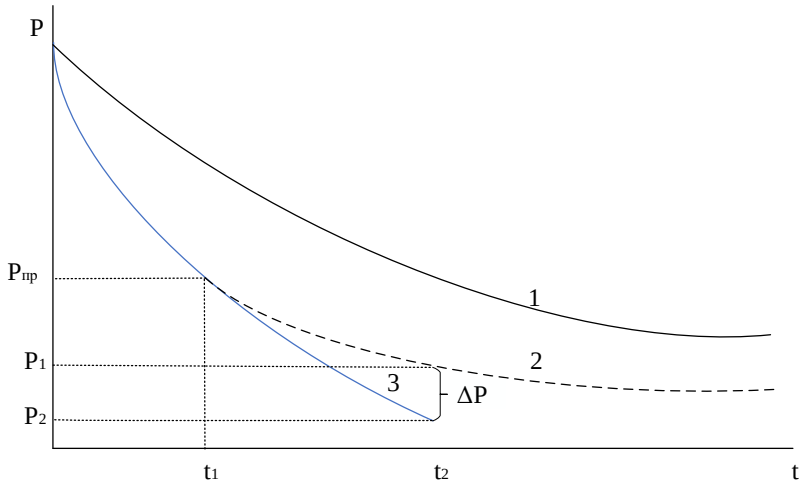


Рис. 3. Пример перехода с применения на хранение

Однако, момент времени t_2 не настал, так как наступил этап хранения, который характеризуется следующей вероятностью возникновения отказов:

$$P_2 = P_1 \times e^{-\frac{t_2 - t_1}{T_0 \times K_x}} = e^{-\frac{t_1}{T_0}} \times e^{-\frac{t_2 - t_1}{T_0 \times K_x}} = e^{-\frac{1}{T_0 \times K_x}(t_1 \times K_x + t_2 - t_1)}, \qquad (2)$$

где K_x - коэффициент хранения; t_1 – время конца применения (начала хранения).

Чтобы определить, на какую величину изменится время возникновения отказа при переходе средства связи с применения на хранение, необходимо определить разницу ΔP между вероятностями возникновения отказа для применения и для хранения. Из рис. 3 видно, что ΔP является разницей между P_2 и P_1 и определяется выражением

$$\Delta P = P_2 - P_1 = e^{-\frac{t_2}{T_0}} - e^{-\frac{1}{T_0 \times K_x}(t_1 \times K_x + t_2 - t_1)}, \qquad (3)$$

Тогда

$$\Delta t = -T_0 \times \ln(P), \text{ а } t_{\text{отк}} = t_2 + \Delta t \qquad (4)$$

При анализе этапов технической эксплуатации был определен ряд возможных переходов с этапа на этап: переход с хранения на техническое обслуживание и с технического обслуживания снова на хранение; переход с хранения на применение; переход с применения на техническое обслуживание и с технического обслуживания на хранение.

Под эффективностью понимается степень соответствия исследуемого процесса функционирования объекта требованиям, предъявляемым со стороны пользователя. Для рассматриваемой системы технической эксплуатации средств связи внешним пользователем (старшей системой) является система связи. Система связи предъявляет к системе технической эксплуатации требования по обеспечению технической готовности средств связи к использованию по назначению. Под обобщенным показателем эффективности понимается совместная вероятность выполнения всех требований, предъявляемых к процессу функционирования исследуемой системы. Показателями, оценивающим качество функционирования средств связи на этапе применения по назначению, являются коэффициенты готовности, оперативной готовности и технического использования.

Задача оптимизации – определение такого сочетания действующих управляемых факторов и их величин, при котором обеспечивается показатель эффективности не хуже требуемого. При этом необходимо построить систему обеспечения технической готовности средств связи при минимизации ресурса на материальные средства, приборы и личный состав.

Задача оптимизации решается методом Бокса – Уилсона [8]. Его смысл заключается в последовательной постановке небольших серий опытов, в каждой из которых одновременно варьируются по определенным правилам все факторы. Серии организуются таким образом, чтобы после математической обработки предыдущей можно было выбрать условия проведения (т.е. спланировать) следующую серию. Применение планирования эксперимента делает поведение экспериментатора целенаправленным и организованным, существенно способствует повышению производительности его труда и надежности полученных результатов.

Список литературы

1. ГОСТ РВ 0101–001–2007. Эксплуатация и ремонт изделий военной техники. Термины и определения, 2007.

2. Приказ МО РФ от 28.12.2013 года № 969 «Об утверждении Руководства по содержанию вооружения и военной техники общевойскового назначения, военно-технического имущества в Вооруженных Силах Российской Федерации».

3. ГОСТ 2.601–95. Эксплуатационные документы. Единая система конструкторской документации, 1995.

4. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. М.: Советское радио, 1966. 166 с.

5. Барзилович Е.Ю., Каштанов В.А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. М.: Сов. радио, 1971. 271 с.

6. Маньшин Г.Г. Управление режимами профилактик сложных систем. Минск.: Наука и техника, 1976. 255 с.

7. Червонный А.А., Лукьященко В.И., Котин Л.В. Надежность сложных систем. М.: Машиностроение. 1972. 304 с.

8. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.

Морозов Александр Викторович, канд. техн. наук, доцент, moroz19558@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Самохвалов Александр Аркадьевич, адъюнкт, samokhvalov-83@inbox.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Устинов Александр Александрович, главный эксперт, ustinov35778@gmail.com, Россия, Москва, Главное управления связи ВС РФ

SETTING A TASK FOR DEVELOPING A MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF TECHNICAL OPERATION OF COMMUNICATION FACILITIES

A.V. Morozov, A.A. Samokhvalov, A.A. Ustinov

The article presents a mathematical model of the process of technical operation of communication facilities. The proposed model allows us to obtain probabilistic and temporal characteristics of the functioning of communication facilities when they are used for their intended purpose.

Key words: communication tools, model, security, rating, availability coefficient.

Morozov Alexander Viktorovich, candidate of technical sciences, docent, moroz19558@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marsha la Soviet Union S.M. Budyonny,

Samokhvalov Alexander Arkadevich, postgraduate, samokvalov83@inbox.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshala Soviet Union S.M. Budyonny,

Ustinov Alexander Alexandrovich, chief expert, ustinov35778@gmail.com, Russia, Moscow, Main Directorate of communications of the armed forces of the Russian Federation

УДК 004.7

ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЖИВУЧЕСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ В УСЛОВИЯХ КОМПЛЕКСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ

С.А. Багрецов, Н.Б. Ачкасов, М.А. Сиверс, А.С. Лаута

В статье рассмотрены возможные варианты оценки живучести информационно-телекоммуникационной сети в условиях комплексного применения средств противодействия и выявлены их недостатки. Обоснована эффективность применения логико-вероятностного метода для расчета живучести, позволяющего значительно сократить количество расчетов при критическом числе дефектов.

Ключевые слова: информационно-телекоммуникационная сеть, дефект, отказ, живучесть.

Согласно классическим положениям, надежность информационно-телекоммуникационной сети (ИТКС) определяется ее безотказностью, ремонтопригодностью и долговечностью. Живучесть определяется независимо от надежности как способность сети сохранять свойства, необходимые для выполнения заданного назначения, в условиях комплексного применения противником средств противодействия, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации [1]. Перечисленные экстраординарные противодействия считаются внешними разрушителями сети.

Однако с расширением ИТКС, не менее актуальной стала задача придания сети способности противостояния внутренним разрушителям, главным из которых являются отказы ее компонентов. Поэтому в случае рассмотрения ИТКС гражданского назначения термин «живучесть» стали применять для обозначения указанной способности [2-4]. Он может быть использован в этом смысле и при изучении ИТКС военного назначения, когда речь идет о внутренних, спонтанных разрушителях (отказы, сбои, помехи и др.). Однако во избежание путаницы, тогда термин «живучесть» следует уточнить определением «внутренняя».

Ниже живучесть ИТКС рассматривается только по отношению к внутренним разрушителям, в качестве которых, для определенности, примем внутренние отказы. Сточки зрения всей сети внутренние отказы считаются ее дефектами или нарушениями в условиях комплексного применения средств противодействия. Отказ (внешний) наступает тогда, когда число дефектов и их размещение в сети окажутся для нее критическими. Критическое число дефектов c, уменьшенное на единицу, будем называть запасом живучести сети: $z = c - 1$. Запас живучести ИТКС может оказаться положительным (при наличии избыточности в ней), нулевым (в случае ее отсутствия) и отрицательным (при наличии вероятности отказа сети в момент включения). В общем случае критическое число дефектов (КЧД) является дискретной случайной величиной, зависящей от характера распределения дефектов по элементам ИТКС (и по времени возникновения).

Критическое число дефектов сети, как и любая дискретная случайная величина, характеризуется: рядом распределения $\rho(c)$, $c = 0, 1, 2, ...,$ средним значением $C = \sum_c c\rho(c)$, функцией распределения $U(v) = \sum_{c=\varnothing}^{v} \rho(c)$.

Величину $Z = C - 1$ назовем средним запасом живучести ИТКС, $U(v)$ - уязвимостью, а $V(v) = 1 - U(v) = \sum_{c=v+1}^{\infty} \rho(c)$ - выживаемостью при v-кратном возникновении дефектов в ИТКС.

Надежность ИТКС тесно связана с ее живучестью. Так, вероятность безотказной работы сети [5] будет

$$R(t) = \sum_{c=\varnothing}^{\infty} f(c,t)V(c), \qquad (1)$$

где $f(c,t)$ - вероятность возникновения в ИТКС за время t c отказов в условиях комплексного применения средств противодействия противника.

Для простейшего потока отказов ω она может быть вычислена по формуле

$$f(c,t) = \frac{(\omega t)^c}{ct} e^{-wt}.$$

Вероятность отказа сети

$$Q(t) = \sum_{c=\varnothing}^{\infty} f(c,t)V(c),$$

среднее время безотказной работы

$$T = C\theta,$$

где θ - среднее время между соседними моментами возникновения дефектов $(\theta = 1/\omega)$.

Поток отказов восстанавливаемой (после отказа) сети определяете параметром

$$\Omega(t) = \omega(t)/C$$

где $\omega(t)$ - параметр пуассоновского потока дефектов в ИТКС (для простейшего $\omega(t) = \omega = \text{const}$).

В работе [5] предложен экспериментальный метод оценки живучести ИТКС. В его основе лежат имитационные розыгрыши процесса образования дефектов в ИТКС до наступления отказных ситуаций, моменты наступления которых определяются данными анализа возможности работы сети в условиях в условиях разыгранной комбинации дефектов (противодействия). Полученные в результате N розыгрышей значения запаса живучести z служат исходными данными для статистических оценок ее параметров, в частности для оценки ряда распределения $\rho^*(z) = n_z / N$ и среднего значения $Z^* = \frac{1}{N}\sum_z z n_z$, где n_z - количество розыгрышей, в которых запас живучести оказался равным z. Однако данный метод, являясь статистическим, дает приближенную оценку параметров, точность которой возрастает медленнее, чем число испытаний N. Предлагаемый ниже более сложный расчетный метод сразу дает точные результаты.

Состояние сети описывается вектором $X=(x_1,x_2,...,x_n)$, двоичные переменные x_i которого в свою очередь описывают обобщенные состояния ее сегментов. Их всего два: работоспособное состояние $x_i=1$ и состояние отказа $x_i=0$. Конкретное состояние X, в которое должна попасть сеть, определяется характером дефектирующего воздействия (комплексного применения средств противодействия противника), описываемого вектором распределения дефектов по сегментам: $D=(d_1,d_2,...,d_n)$.

Обозначим M_d множество векторов D таких, что сумма компонент d_i каждого из них равна d, а (D) – вероятность распределения d дефектов в сети в соответствии с вектором $D\in M_d$, тогда по формуле полной вероятности получим

$$P(X\,|\,d)=\sum_{D\in M_d}\rho(D)P(X\,|\,D), \qquad (2)$$

где $P(X\,|\,D)$ - условная вероятность попадания ИТКС в состояние X под воздействием D.

Согласно [4], число слагаемых в сумме (2) будем

$$m=|M_d|=\frac{(n+d-1)!}{d!(n-1)!}. \qquad (3)$$

Вероятность осуществления d-кратного противодействия по варианту $D=(d_1,d_2,...,d_n)$ определяется по формуле

$$\rho(D)=\frac{d!}{d_1!d_2!...d_n!}\gamma_1^{d_1}\gamma_2^{d_2}...\gamma_i^{d_i}...\gamma_n^{d_n}, \qquad (4)$$

где γ_i - вероятность того, что произвольно выбранный дефект в серии из d дефектов придется на i-й сегмент сети; если ω_i - поток дефектов в этом сегменте сети, а суммарный поток дефектов равен ω, то $\gamma_i=\omega_i/\omega$ и, следовательно, $\sum_{i=1}^{n}\gamma_i=1$.

Замечание. В случае сложной сети сохранение потока дефектов на уровне ω_i после образования в ней ряда дефектов вполне оправдано, так как большинство элементов сегмента сети может оставаться под воздействием нагрузок. Более того, γ гипотезу целесообразно принять и для простых сетей, отказ которых наступает с появлением первого дефекта. Искусственное сохранение потока дефектов на прежнем уровне не влияет на корректность получаемых результатов, поскольку дополнительные дефекты отказавшей сети не нарушают условий сохранения или потери работоспособности сети в целом.

Воздействие D вызывает переход ИТКС в состояние X в том случае, если каждый ее i-й сегмент под воздействием d_i дефектов окажется в состоянии $x_i=\varnothing$ или $x_i=1$, заданном i-й компонентой вектора X. Вероятность такого условия определяется выражением

$$P_i(x|v)=\begin{cases}V_i(v) \text{ для } x=1,\\ U_i(v) \text{ для } x=\varnothing.\end{cases} \qquad (5)$$

Для простой сети, не обладающей запасом живучести, вероятность такого условия вычисляется по формуле

$$\left\| P_i(x|v) = \begin{cases} x_i & \text{при } v = \varnothing \\ \bar{x}_i & \text{при } v > \varnothing \end{cases} \right\|, \qquad (6)$$

которая означает, что вероятности состояний $x_i = 1$ и $x_i = \varnothing$ в случае отсутствуя дефектов соответственно равны единицы и нулю и, наоборот, нулю и единице при их наличии. Для сложных сетей функции $V_i(v)$ и $U_i(v)$ должны быть вычислены заранее.

Теперь можно определить оставшуюся неизвестной в выражении (2) условную вероятность $P(X|D)$, которая в силу независимости условий перехода сети в заданные состояние $x_i = \varnothing$ или $x_i = 1$ равна произведению условных вероятностей $P_i(x|v)$ при соответствующем количестве дефектов $v = d_i$:

$$P(X|D) = \prod_{i=1}^{n} P(x_i|d_i). \qquad (7)$$

Вероятность совместного появления d_i дефектов в *i*-м сегменте сети (при $d_i \le d$) и ее состояния x_i будет

$$\alpha_i(x_i \wedge d_i) = \gamma_i^{d_i} P_i(x_i|d_i). \qquad (8)$$

Тогда с учетом (7) и (4) исходное выражение (2) для определяемой условной вероятности $P(X|d)$ запишется так:

$$P(X|d) = \sum_{D \in M_d} \frac{d!}{d_1! d_2! \ldots d_n!} \prod_{i=1}^{n} \alpha_i(x_i \wedge d_i). \qquad (9)$$

Непосредственно вычисления $P(x|d)$ по формуле (9) затруднительно, так как согласно (3) при этом необходим перебор и вычисление большого числа слагаемых (m). Например, при n = 11 и d = 10 имеем m = 183756.

Рассмотрим способ уменьшения размерности задачи, при котором число переборов оказывается равным $(n-1)d$. Для рассмотренного примера он позволяет сократить объем вычислений почти в 2000 раз.

Расчленим искусственно сеть на комплексы. Первый комплекс k_1 состоит из первого сегмента, так что $k_1 = x_1$, а каждый последующий комплекс k_i включает *i*-й по порядку индексации сегмент x_i и предыдущий комплекс k_{i-1} так, что $k_i = k_{i-1} \wedge x_i$. Очевидно, последний комплекс k_n включает всю сеть в целом: $k_n = k_{n-1} \wedge x_n$. Состояние *i*-го комплекса описывается вектором $K_i = (x_1, x_2, \ldots, x_i)$; в качестве значений компонент его берутся значения i первых компонент вектора X, определяющего состояние сети, условная вероятность $P(x|d)$ которого вычисляется.

Начнем вычисление с комплекса k_1. Очевидно, k_1 вероятность совместного наступления в нем v дефектов и состояния K_1 будет $P(K_1 \wedge v) = \alpha_1 (x_1 \wedge v)$. Поскольку в каждом из комплексов может быть сосредоточено $v \le d$ дефектов, то соответствующие вероятности $P(K_1 \wedge v)$ должны быть вычислены для всех значений v на интервале $(\bar{\varnothing} - d)$.

Если сеть не обладает запасом живучести, то, учитывая (6) и (8), вероятность совместного наступления v дефектов и заданного состояния сети выразится следующим образом:

$$\alpha(x \wedge v) = \begin{cases} \gamma^{v} x \text{ при } v = \varnothing, \\ \gamma^{\bar{v}} x \text{ при } v > \varnothing. \end{cases} \tag{10}$$

Пусть вероятность $P(K_{i-1} \wedge v)$ определена для комплекса k_{l-1} и всех $v \in \overline{\varnothing, d}$. Тогда вероятность $\beta_i(r; v)$ комплексного применения средств противодействия, как сложного события, $s_i(r; v) = (K_{i-1} \wedge r) \wedge (x_1 \wedge (v - r))$ может быть вычислена по биноминальной формуле:

$$\beta_i(r; v) = \frac{vl}{rl(v-r)l} P(K_{i-1} \wedge r) \alpha_i (x_i \wedge (v - r)).$$

Учитывая, что для некоторого v все события $s_i(r; v)$ в количестве v +1, перечисляемые по $r \in \varnothing, v,$ являются несовместными, имеем

$$P(K_i \wedge v) = \sum_{r=\varnothing}^{v} \beta_i(r; v) = \sum_{r=\varnothing}^{v} \frac{v!}{r!(v-r)!} P(K_{i-1} \wedge r) \alpha(x_i \wedge (v - r)). \tag{11}$$

Вычислив вероятность $P(K_n \wedge d)$ для комплекса k_n, найдем условную вероятность состояния X для всей сети, т. е. $P(X \mid d) = P(K_n \wedge d)$, так как $\sum_{D \in M_a} \rho(D) = 1$. Таким образом, используя комплексы, вместо m-кратного применения полиномиальной формулы $(n-1)d$ раз применением биномиальную. Этим и достигается сокращение объема вычислений при расчете условной вероятности $P(X \mid d)$.

Разделим пространство состояний ИТКС X на подпространство X_1 работоспособных состояний и пространство X_0 неработоспособных состояний, в которых обобщенное состояние ИТКС φ соответственно равно единице и нулю. Выживаемость ИТКС определится как вероятность суммы несовместных событий $X \in X_1$:

$$V(d) = P(1 \mid d) = \sum_{x \in X_1} P(X \mid d). \tag{12}$$

При большом числе сегментов сети n вычисление работоспособных состояний сети из всех 2^n возможных состояний и вычислений для них вероятностей $P(X \mid d)$ по формуле (11) затруднительно. Поэтому в ряде случаев логическую. Функцию работоспособности (ЛФР) [1] сети $\varphi = \varphi(X)$ целесообразно разложить в ортогональную дизъюнктивную нормальную формулу (ОДНФ) такую, что составляющие ее конъюнкции (импликанты)

будут ортогональны между собой. Если импликанты q_j содержит r букв $(r \le n)$, то она охватывает 2^{n-r} состояний $X \in X_1$ и, следовательно, обозначает суммарное событие Q_j, вычисление вероятности которого по сравнению с вычислением вероятностей всех его слагаемых $X \in Q_j$ сокращается по объему в 2^{n-r} раз. Ортогональность импликант имеет свои следствием несовместимость суммарных событий Q_j и возможность вычисления выживаемости сети по формуле

$$V(d) \sum_i P(Q_j | d), \tag{13}$$

где $P(Q_j | d)$ - условная вероятность того, что сеть при d дефектах окажется в одном из состояний $X \in Q_j$.

Задача ортогонализации ЛФР составилась и решалась исследователями надежности разными методами. Один из них основан на алгоритме ортогонализации Ю. В. Мерекина. Применение этого алгоритма на примере ЛФР

$$\varphi = x_7(x_2x_4(x_6 \vee x_8x_3x_5) \vee x_1x_3(x_5 \vee x_8x_6x_4) \tag{14}$$

дало такой результат [1]:

$$\varphi = \begin{vmatrix} x_1 & x_3 & x_5 & x_7 & & & & \\ \overline{x_1} & x_2 & x_4 & x_6 & x_7 & & & \\ x_1 & x_2 & \overline{x_3} & x_4 & x_6 & x_7 & & \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & \overline{x_5} & x_6 & x_7 & \\ x_1 & \overline{x_2} & x_3 & x_4 & \overline{x_5} & x_6 & x_7 & x_8 \\ \overline{x_1} & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & \overline{x_6} & x_7 & x_8 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{vmatrix}.$$

Некоторое конкретное состояние сети задаются набором нулей и единиц. Так, импликанта q_3 охватывает область Q_5, состоящую только из одного состояния, задаваемого набором $X = 10110111$, а q_2 - область состояний Q_2, которую условно можно обозначить набором $Q_2 = 01x_31x_511x_8$. Единицы и нули набора соответствуют прямому и инверсному вхождению букв в запись импликанты, а их положение в наборе указано индексами заменяемых букв. В оставшихся l позициях соответственно индексам проставляются недостающие буквы. Подставляя вместо записанных букв все возможные комбинации их значений, получаем 2^l векторов X из области Q_j.

Вероятность реализации любого из несовместных событий Q_j может быть определена по рекуррентной формуле (11). При этом надо иметь в виду, что вероятность $\alpha_i(x_i \wedge v)$, значение x_i для которых не определено (т.е. в i-й позиции набора Q_j стоит буква), вычисляются по формуле

$$\alpha_i(x_i \wedge v) = \gamma_i^v, \tag{15}$$

так как относятся только к факту попадания в i-й сегмент сети некоторой фиксированной группы, состоящей из v дефектов, без учета характера исхода, который не имеет значения для реализации событий Q_j. В результате вычисления вероятностей $(Q_j|d)$ вместо $P(X|d)$ объема расчетов может быть сокращено во столько раз, во сколько количество наборов в X_1 больше числа ортогональных импликант q_j или несовместных событий (областей) Q_j.

Объем вычислений может быть несколько уменьшен еще, если принять во внимание, что с точки зрения реализации событий Q_j безразлично, каким образом дефекты распределяются по тем сегментам сети, состояние которых в наборах Q_j не определяется. Все они могут рассматриваться как сборка q_j сегментов сети x_j с буквенным представлением в наборе Q_j.

Так, для Q_2 сборка $x_2 = x_3x_5x_8$. Вероятность того что группа из v дефектов сети придется на сборку в наборе Q_j будет $\alpha_j(x_j \wedge v) = (\sum \gamma_i)^v$, где i пробегает значения индексов букв, содержащихся в наборе Q_j. Расчеты $P(Q_i|d)$ ведутся затем по формуле (11), начиная с комплекса сборки $k_0 = x_j$, со включением в каждый последующий комплекс по порядку оставшихся сегментов, состояние которых в наборе Q_j определено.

Заключение. В вопросе повышения надежности ИТКС вместе с уменьшением вероятности возникновения в ней дефектов важное значение имеет разработка ее рациональной структуры и способов резервирования. Представляется, что критерии живучести сети $V(d)$ и Z при заданном значении потока дефектов в ИТКС.

Модель отказа (воздействия средств противодействия) ИТКС с потерей живучести может быть использована не только для расчета ее надежности, но и для ускорения испытаний на надежность, так как в случае известных характеристик живучести наблюдению должны подвергнуться возникающие в ней дефекты.

Список литературы

1. Горский Ю.М., Астафьев В.И., Казначеев В.П. и др. Манипуляционные работы и управляемые механизмы. Гомеостатических подход // Гомеостатика живых технических, социальных и экологических систем. Новосибирск: Наука. Сиб. Отд., 1990. С. 242-250.

2. Головченко Е.В., Дьяченко В.А. Тензорный метод расчета основных характеристик телекоммуникационной сети // Телекоммуникация, 2015. № 8. С.12-19.

3. Коцыняк М.А., Лаута О.С., Иванов Д.А., Спицын О.Л. Распределение средств защиты информационно-телекоммуникационной сети в условиях воздействия таргетированных кибернетических атак // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2019. № 2 (34). С. 19-22.

4. Коцыняк М.А., Лаута О.С., Иванов Д.А., Спицын О.Л. Подход к оценке качества элементов информационно-телекоммуникационной сети в условиях целевых компьютерных атак // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2019. № 2 (34). С. 23-25.

5. Kotenko I., Saenko I., Lauta O. Analytical modeling and assessment of cyber resilience on the base of stochastic networks conversion // Proceedings of 2018 10th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling, RNDM 2018 10. 2018. P. 8489830.

Багрецов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, старший научный сотрудник, sergeibagrecov@bk.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Ачкасов Николай Борисович, д-р воен. наук, профессор, cverel@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Сиверс Мстислав Аркадьевич, д-р техн. наук, профессор, nadir@fppk.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,

Лаута Александр Сергеевич, аспирант, alexander_lauta@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

LOGICAL-PROBABILISTIC METHOD FOR CALCULATING THE SURVIVABILITY OF AN INFORMATION AND TELECOMMUNICATIONS NETWORK IN THE CONDITIONS OF COMPLEX APPLICATION OF COUNTERACTION MEANS

S.A. Bagrecov, N.B. Achkasov, M.A. Sivers, A.S. Lauta

Annotation. The article considers possible options for assessing the survivability of an information and telecommunications network in the conditions of complex use of counteraction tools and identifies their shortcomings. The effectiveness of the logical-probabilistic method for calculating survivability is proved, which allows significantly reducing the number of calculations for a critical number of defects.

Key words: information and telecommunications network, defect, failure, survivability.

Bagretsov Sergey Alekseevich, doctor of technical sciences, professor, senior researcher, sergeibagrecov@bk.ru, Russia, Saint Petersburg, Military space academy named after A.F. Mozhaysky,

Achkasov Nikolay Borisovich, doctor of military sciences, professor, cverel@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budennogo,

Sivers Mstislav Arkadievich, doctor of technical sciences, professor, nadir@fppk.ru, Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg state University of telecommunications named after prof. M.A. Bonch-Bruevich,

Lauta Alexander Sergeevich, student, alexander_lauta@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg state University of telecommunications named after prof. M.A. Bonch-Bruevich

УДК 620.197

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СОВРЕМЕННОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ОГНЕСТРЕЛЬНОГО ОРУЖИЯ С ПРЕДЛОЖЕНИЕМ НОВОЙ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СХЕМЫ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОГО ПРИКЛАДА

Д.О. Селифонтов, Н.Е. Стариков, И.С. Науменко

Проанализированы конструктивные особенности современных образцов автоматического огнестрельного оружия и предложена новая перспективная схема складного телескопического приклада, направленная на повышение эксплуатационных характеристик данного вида оружия.

Ключевые слова: штурмовая винтовка, автомат, складной телескопический приклад, эксплуатационные характеристики.

В этом году весь мир отпраздновал 75-летие со дня победы над фашистскими захватчиками. За это время стрелковое оружие претерпело колоссальные изменения, связанные в первую очередь с развитием промышленности и станкостроения. На смену стали и дереву пришли новые материалы, позволяющие снизить массу оружия, но при этом обеспечить надежность и прочность изделий на достаточно высоком уровне.Ктаким материалам относятся: ударопрочные пластмассы (полиуретаны), сплавы алюминия, сплавы титана и т.д.

Не только масса и материалы преобразовали внешний облик современного оружия, но и конструкция образцов претерпела значительные изменения, такие как использование модульной конструкции (быстрое приспосабливание оружия для решения различных тактических задач, стрельбы разными боеприпасами, установка различных прицельных приспособлений, а также заложенная ещё на стадии проектирования возможность установки большей номенклатуры дополнительного оборудования и т.п.).

Все вышесказанное, а также многолетний опыт оружейников-мастеров своего дела, позволили увидеть нам всю красоту инженерной мысли, представленное в многообразии современных образцов вооружения.

Наибольшее распространение во всем мире получили штурмовые винтовки (автоматы). Рассмотрим одни из самых современных образцов данного типа оружия, которые представляют наибольший интерес.

К первому такому образцу относится итальянский стрелково-гранатомётный комплекс ARX-160 фирмы Beretta (рис. 1), который включает в себя 5,56-мм автомат и 40х46 мм подствольный гранатомёт, который также может использоваться автономно. Винтовка Beretta ARX-160 является важным элементом перспективного комплекса оснащения пехотинца «SoldatoFuturo» (солдат будущего), в который помимо винтовки и подствольного гранатомета входит специальный электронно-оптический прицел (с оптическим, телевизионным и ИК каналами, а также лазерным целеуказателем и системой передачи данных).

Модульная конструкция комплекса позволяет, после замены ряда деталей использовать патроны 5,56х45 мм, 5,45х39 мм, 7,62х39 мм, 6,8х43 мм, т.е. фактически, весь спектр производящихся сегодня промежуточных патронов. Автомат комплектуется быстросменными стволами 406 и 305 мм, на замену которых уходит не более пяти секунд.



Рис. 1. Штурмовая винтовка Beretta ARX-160 в комплекте с подствольным гранатометом Beretta GLX-160 и перспективным оптоэлектронным прицельным комплексом

Штурмовая винтовка Beretta ARX-160 имеет традиционную автоматику, работающую по принципу газоотвода с коротким ходом газового поршня. Запирание канала ствола осуществляется поворотом затвора.

Отличительной особенностью для данного вида оружия являются возможность быстрой замены ствола в полевых условиях без разборки оружия. Чтобы снять ствол необходимо отвести затвор назад и зафиксировать его затворной задержкой, а затем нажать кнопку фиксатора (находящийся с правой стороны ствольной коробки, перед приемником магазина) и извлечь ствол движением вперед. Ствольная коробка выполнена из ударопрочного полимера, из него же выполнен корпус ударно-спускового механизма, объединенный в один блок с приемником магазина и пистолетной рукояткой.

Другой необычной особенностью данной винтовки является возможность быстрого переключения направления выброса стреляных гильз (на левую или на правую сторону), поэтому окна для выброса гильз имеются на обеих сторонах ствольной коробки. Переключение направления

выброса стреляных гильз осуществляется при помощи нажатия кончиком пули или любым другим острым твердым предметом на специальный поперечный штифт, который расположен в задней части ствольной коробки. В результате перемещения штифта на ту или другую сторону два симметрично расположенных в затворе выбрасывателя-отражателя меняются своими функциями, обеспечивая выброс гильз в выбранную сторону.

Питание патронами осуществляется из магазинов стандарта НАТО (совместимых с винтовками М16).

В конструкции винтовки предусмотрена затворная задержка. Предохранитель-переводчик режимов огня расположен на обеих сторонах ствольной коробки и обеспечивает ведение одиночного и автоматического огня. Также рукоятка перезаряжания имеет возможность переустановки на обе стороны ствольной коробки.

Штурмовая винтовка Beretta ARX-160 оснащена складным вбок на правую сторону пластиковым прикладом, имеющим регулировку по длине (5-ступенчатый телескопический механизм).

На ствольной коробке и цевье винтовки расположены алюминиевые направляющие типа Picatinnyrail (рельса-кронштейн), на которые могут устанавливаться различные аксессуары и дополнительное оборудование.

Штатно винтовка комплектуется открытым прицелом с мушкой и целиком, расположенными на складных быстросъемных основаниях.

Автомат с 2012 года поступил на вооружение итальянской армии и предлагается на экспорт. В частности, вариант автомата под советский патрон 7,62х39 (используются магазины от АКМ), принят на вооружение силами специальных операций республики Казахстан.

Другим, не менее интересным образцом, является автоматическая винтовка Heckler-Koch HK417 калибра 7,62-мм НАТО, разработанная на базе автоматической винтовки Heckler-Koch HK416 калибра 5,56-мм НАТО. Разработка винтовки НК 417 была начата в 2005 году на основе опыта, полученного войсками международной коалиции в Афганистане и Ираке, где в определенных условиях оружие калибра 5,56-мм показало недостаточную эффективную дальность стрельбы и недостаточное пробивное и останавливающее действие малокалиберных пуль. Винтовка серии НК 417 поступила в серийное производство в 2008 году и предназначена для вооружения армии и полиции.

Винтовка HK417 имеет модульную конструкцию, в значительной мере повторяющую конструкцию американской винтовки М16, с одним важным отличием - германская винтовка HK417 имеет измененную систему газоотводной автоматики, с коротким рабочим ходом газового поршня. Запирание ствола данной винтовки осуществляется поворотом затвора с 7 боевыми упорами. Особенностью конструкции НК 417 является возможность сравнительно быстрой (3-5 минут) замены стволов силами самого пользователя и с использованием минимума инструмента.



Рис. 2. Автоматическая винтовка Heckler-Koch HK417, вариант со стволом длиной 30см

Всего предлагается 4 варианта стволов - обычные длиной 300 и 400мм и «снайперские» (улучшенной обработки) длиной 400 и 500мм. При использовании «снайперских» стволов и соответствующих патронов винтовка обеспечивает кучность стрельбы одиночными выстрелами на уровне 1 угловой минуты (1 MOA).

Ствольная коробка выполнена из алюминиевого сплава, состоящая из двух половин, которые соединеныдвумя поперечными штифтами. Предохранитель-переводчик режимов огня имеет три позиции, благодаря которым обеспечивается стрельба одиночнымогнем и очередью.

В конструкции сохранены традиционные для винтовок серии M16 расположенная над прикладом Т-образная рукоятка перезаряжания, а также механизм затворной задержки. На верхней поверхности ствольной коробки, а также на цевье выполнены направляющие для крепления прицельных приспособлений (открытых либо оптических), а также иных аксессуаров.

Приклад телескопический раздвижной, многопозиционный, но не складной, аналогичен по конструкции прикладу карабина M4.

Винтовки серии НК 417 используют специально разработанные для них полимерные прозрачные магазины емкостью 10 или 20 патронов.

Говоря о современных штурмовых винтовках невозможно обойти вниманием комплекс SCAR (Special Operations Forces Combat Assault Rifle). Штурмовая винтовка FN SCAR была создана для участия в конкурсе по разработке автомата для сил USSOCOM (Командования специальных операций США), 2003 г. Согласно требованиям конкурса винтовка должна была, во-первых, максимально использовать принцип модульности, т.е. быть легко адаптируемой для конкретных тактических условий, во-вторых, по надёжности превосходить штатный карабин M4. Также техническое задание предполагало наличие у разрабатываемых образцов комплектов переоснастки под боеприпасы 7,62x39, 6,8 Rem и др. В 2004-м году FN SCARпобедила в конкурсе. С того момента и по сей день винтовка поступает на вооружение элитного полка легкой пехоты США (рейнджеров). Также винтовка состоит на вооружение сил специального назначения США в Афганистане и Ираке.

Официальное название винтовки Mark 16 / Mk.16 SCAR-L и Mark 17 / Mk.17 SCAR-H.

Автоматики винтовки SCAR основана на коротком ходе газового поршня, который отделен от затворной рамы. Сам поршень размещен в газоотводном блоке на стволе. Нижняя часть ствольной коробки выполнена из полимерного материала, верхняя - алюминиевая.



Рис. 3. Автоматическая винтовка FN SCAR

В верхней части ствольной коробки размещены ствол и затворная группа, в нижней – модуль УСМ и приемник магазина. Затвор поворотного характера имеет три боевых упора. Запирание происходит за казенную часть ствола. Стволы автомата сменные.

Замена ствола не требует особенных инструментов и обычно занимает несколько минут. Крепятся они же к верхней половине двумя поперечными болтами. Стрельбу можно вести как одиночными выстрелами, так и очередями. Переключение режимов стрельбы обеспечивает предохранитель-переводчик режимов стрельбы. Приклад у всех вариантов винтовки FN SCAR складной вбок на правую сторону ствольной коробки. Он выполнен из пластика и допускает регулировку по длине для адаптации под каждого конкретного стрелка.

В России современным образцом оружия являетсяавтомат АК-12 (Автомат Калашникова 2012 года) конструкции концерна «Ижмаш», разработанный на замену морально устаревшим автоматам АК-74 и АКМ. В 2018 году АК-12 был принят на вооружение Сухопутных войск, ВДВ и морской пехоты РФ (рис.4).



Рис. 4. Автомат Калашникова АК-12

Оружие использует классическую схему автоматики с длинным ходом газового поршня, но с конструкционными изменениями в отличие от АК-74 и АКМ. Переконструирован ударно-спусковой механизм, обновлена затворная группа и ствольная коробка. Крышка ствольной коробки закреплена таким образом, чтобы исключить возможность «люфта», следовательно, появилась возможность устанавливать на расположенную на ней планку типа «Picatinny», прицельные приспособления различных видов. Рукоятка перезаряжания перенесена вперёд и может, по желанию стрелка, быть переставлена на левую или правую сторону ствольной коробки. Изменилась и конструкция предохранителя-переводчика огня, он теперь вынесен на обе стороны оружия и имеет четыре положения: «предохранитель», «стрельба одиночными», «фиксированные очереди по 3 выстрела», «автоматический огонь».

В конструкции оружия появилась затворная задержка, что позволило ускорить перезарядку. Складной телескопический приклад (на левую сторону) имеет регулируемые по высоте накладку и затыльник, что позволяет настроить автомат под антропометрические данные конкретного стрелка.

Из других новшеств автомата - обилие планок типа «Picatinny», расположенных, не только на крышке ствольной коробки, но ещё и на верхней накладке цевья и на его боковых поверхностях; модифицированные для повышения кучности нарезы и пульный вход ствола; новый дульный тормоз-компенсатор, позволяющий вести огонь надульными гранатами зарубежного производства. Также в скором времени появятся версии АК-12 под разные виды боеприпасов - от 5,56х45 и 7,62х39 до 7,62х51 НАТО. Автомат может использоваться как со штатными магазинами соответствующего калибра, так и с новым четырёхрядным магазином ёмкостью 60 патронов.

Как бы не были хороши современные образцы современных штурмовых винтовок (автоматов), но всегда существует возможность их дальнейшей модернизации. К такой модернизации можно отнести - возможность производить складывание приклада на обе стороны ствольной коробки, что позволит повысить удобство пользования данным типом оружия.

Известен способ, где данная задача решается следующим образом: «приклад стрелкового оружия состоит из корпуса с плечевым упором, в корпусе расположена направляющая трубка, взаимодействующая с телескопической штангой. Дополнительно установлена скоба-антабка, компенсационная втулка со штифтом, расположенная в продольном пазу штанги, причем штанга имеет наконечник и выполнена с возможностью поворота вокруг продольной оси на 180°. На телескопической штанге выполнены симметричные сквозные отверстия. В корпусе приклада расположена клавиша, выполненная подпружиненной, и фиксатор, взаимодействующий с отверстиями штанги. На плечевом упоре расположена защелка с симметричными зацепами» [5].

Недостатком данного технического решения является невозможность обеспечить быстрое складывание приклада на обе стороны ствольной коробки без проведения дополнительных работ по переустановке деталей приклада на 180 градусов при помощи инструментов.

Поэтому, чтобы повысить эксплуатационные характеристики автоматического стрелкового оружия, предлагается следующая конструкция складного приклада (рис. 5-8).

Стрелковое оружие содержит: ствольную коробку со стволом (ствол не показан) 1, приклад телескопический 2, два зацепа 16 расположенные по бокам ствольной коробки, корпус приклада 3 (пластиковый) с вкладышем 15, установленный на штангу 4, пружину приклада 5 установленную в отверстие штанги 4, металлический тросик 6, который обеспечивает стыковку штанги 4 с муфтой 7 через чашечку 8 под действием упру-

гих сил пружины, на концах тросика имеются втулки 12 зафиксированные шплинтами 13, на штангу 4 запрессовано и зафиксированоштифтом 10 стальное кольцо 11, такого же диаметра, что и муфта 7, благодаря которому, неразрывную связь между муфтой 7 и штангой 4 обеспечивают две стальные пластины 14, удерживаемые при помощи винтов 9.

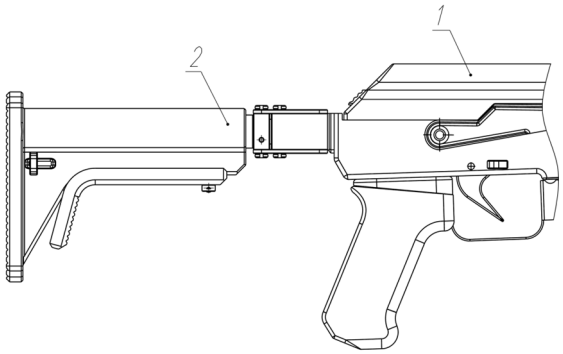


Рис. 5. Общий вид стрелкового оружия с разложенным прикладом

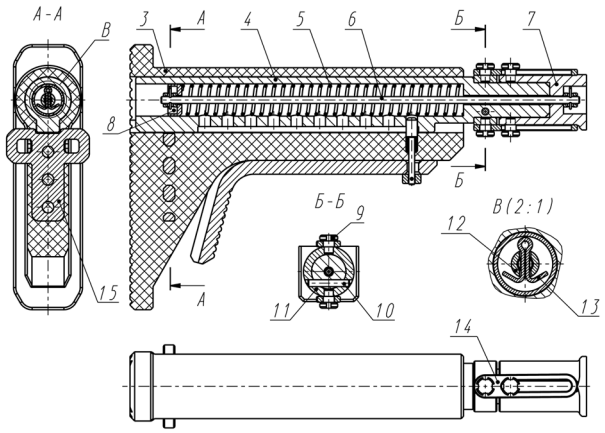


Рис. 6. Устройство приклада

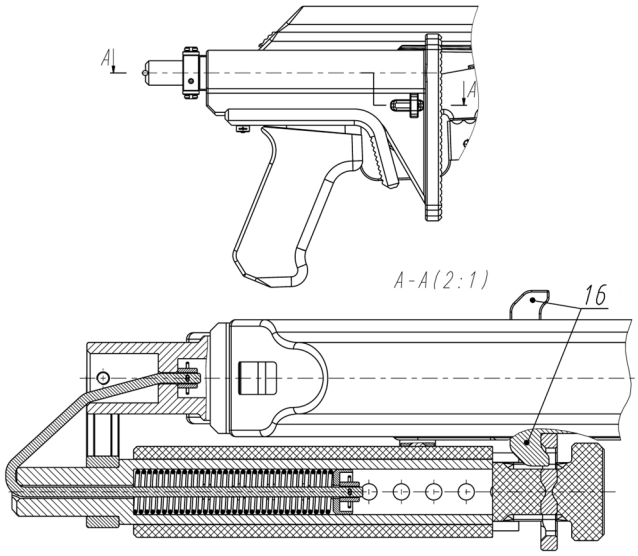


Рис. 7. Общий вид стрелкового оружия с прикладом, сложенным на правую сторону

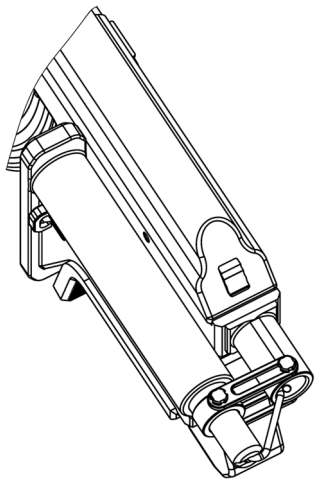


Рис. 8. Общий трехмерный вид стрелкового оружия с прикладом, сложенным на левую сторону

Для складывания приклада телескопического 2 на левую или правую сторону ствольной коробки 1 необходимо потянуть за корпус приклада 3 назад, пока штанга 4 не выйдет из зацепления с муфтой 7. Повернуть приклад телескопический 2 влево или право вокруг шарнирного узла на 180 градусов и зафиксировать на зацепе 16 левом или правом ствольной коробки 1.

Для разложения приклада телескопического2 необходимо потянуть за корпус приклада 3 вперед до разъединения приклада телескопического 2 с зацепом 16, затем повернуть приклад телескопический 2 через шарнирный узел на 180 градусов, вставляя штангу 4 в отверстие муфты 7.

Использование данного технического решения позволит пользователю сложить приклад в удобную для себя сторону при транспортировке или десантировании, а также отрегулировать приклад по длине в соответствии со своими антропометрическими характеристиками, что расширит функциональные возможности стрелкового оружия и повысит удобство пользования оружием.

Список литературы

1. Попенкер М.Р. Штурмовые винтовки мира. М.: АСТ; Спб.: Полигон, 2004. 304 с.

2. Как экономия погубила новый автомат Калашникова АК-12 [Электронный ресурс] URL: https://versia.ru/kak-yekonomiya-pogubila-novyj-avtomat-kalashnikova-ak-12 (дата обращения: 10.02.2020).

3. Штурмовая винтовка FN SCAR [Электронный ресурс] URL: https://www.armoury-online.ru/articles/ar/be/fn-scar/ (дата обращения: 10.02.2020).

4. Штурмовая винтовка FN SCAR [Электронный ресурс] URL: http://weaponscollection. com/ 8/ 1440-shturmovaya-vintovka-fn-scar.html (дата обращения: 10.02.2020).

5. Патент RU №2543139 C1, 26.11.2013, МПК F41A 11/04, F41C 7/00, F41C 23/04.

Селифонтов Денис Олегович, аспирант, denis-selifontov@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Стариков Николай Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, начальник военного учебного центра, starikov_taii@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Науменко Игорь Семенович, военнослужащий, starikov_taii@mail.ru, Россия, Москва, Министерство обороны РФ

RESEARCH OF THE DESIGN FEATURES OF THE MODERN AUTOMATIC FIRE-SHOT WEAPON WITH THE OFFER OF A NEW PERSPECTIVE SCHEME OF THE TELESCOPIC BUTT

D.O. Selifontov, N.E. Starikov, I.S. Naumenko

The design features of modern models of automatic firearms are analyzed and a new perspective scheme of a folding telescopic stock is proposed, aimed at improving the operational characteristics of this type of weapon.

Key words: assault rifle, automatic, folding telescopic stock, operational characteristics.

Selifontov Denis Olegovich, postgraduate, denis-selifontov@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Starikov Nikolay Evgenievich, doctor of technical sciences, professor, head of the military training center, starikov_taii@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Naumenko Igor Semenovich, serviceman, starikov_taii@mail.ru, Russia, Moscow, Ministry of Defense of the Russian Federation

УДК 519.237.4

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДИК СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АГРЕССИВНОСТИ

А.Г. Проаспэт, М.С. Кравчени, Д.А. Пахомов

Результатом исследования показателей агрессивности в коллективе является набор числовых значений. Для дальнейших исследований необходима статистическая оценка среднего уровня агрессивности в группе и возможность отделить испытуемых, показатели агрессивности которых являются повышенными. Данное исследование посвящено анализу различий между средними значениями ряда, полученного в ходе анализу агрессивности по тесту «Рука» – адаптации проективной методики Э. Вагнера, З. Риотровского, Б. Бриклина. Предложен оптимальный способ поиска диапазона средних значений показателей агрессивности группы лиц, а также отделения высоких показателей.

Ключевые слова: математическая статистика, дисперсионный анализ, обработка результатов эмпирического исследования, статистический анализ.

Исследование уровня агрессивности в коллективе включает в себя применение нескольких диагностических методик, в частности, таких, как тест «Рука» или методика личностного дифференциала В.М. Бехтерева. Результатом применения данных методик является набор данных – числовых значений различных показателей агрессивности. Несмотря на то, что диапазон значений в разных методиках отличается, сохраняется общая концепция: по числовым показателям исследователь оценивает ситуацию в коллективе. Таким образом, методика статистического анализа данных, применимая к одному опроснику, такому, как тест «Рука», будет применима и к другим опросникам со схожей концепцией.

При статистическом анализе результатов психологического тестирования наиболее важна следующая информация:

1. диапазон средних значений показателя в данном коллективе;
2. наиболее высокие значения показателя.

Результатом анализа не может быть качественная оценка уровня агрессивности, подобные выводы может делать только исследователь. Цель методики – представить ему для этого все необходимые данные.

Для теста «Рука» определён следующий диапазон значений каждого показателя: от 0 до 100 [1]. Возьмём для анализа следующие наборы значений, соответствующие коллективам с низкой, средней, высокой и распределённой агрессией:

1 ряд: 24 26 29 29 33 49 53 53 74 76 77 79 92 92 95
2 ряд: 3 5 6 11 18 37 41 42 42 51 74 75 78 79 81
3 ряд: 11 14 18 29 41 46 57 68 73 77 80 87 91 96 100
4 ряд: 1 10 18 26 40 41 51 51 51 56 57 60 64 67 69
5 ряд: 32 33 38 47 54 60 63 66 79 80 82 83 88 100 100

Для каждого ряда чисел вычислим моду – наиболее часто встречающееся значение, среднее арифметическое – сумму всех членов ряда, делённую на их количество, размах – разность между наибольшим и наименьшим значением [2], медиану – число, находящееся посередине упорядоченного по возрастанию ряда [3], среднее линейное отклонение – меру разброса значений вокруг их среднего [4] и межквартильный размах – разность между первым и третьим квартилями ряда [5].

Предположительно наиболее ценную для психологических исследований информацию представит вычисление среднего арифметического, медианы и межквартильного размаха. Межквартильный размах особенно ценен тем, что позволяет отделять от выборки аномально высокие значения [6].

Результаты вычисления выбранных средних величин каждого ряда приведены в табл. 1.

Таблица 1

Средние величины рядов значений показателей агрессивности

№ ряда	Мода	Ср. арифм.	Размах	Медиана	Ср. лин. откл.	Межкв. размах
1	29	58.73	71	53	23.18	50
2	42	42.87	78	42	24.1	64
3	-	59.2	89	68	26.45	58
4	51	44.13	68	51	17.17	34
5	100	67	67	66	19.06	36

Такой показатель, как мода, наименее значим для данных психологических исследований. Также анализ показал, что отдельно межквартильный размах также не является достаточно точной характеристикой: данная величина для ряда, где среднее арифметическое меньше, как и минимальное и максимальное значение, оказалось значительно выше, чем для ряда, где все перечисленные величины выше.

Однако среднее арифметическое и медиана подвержены влиянию аномально высоких и низких значений. Таким образом, ни одна из средних величин не может самостоятельно характеризовать ряд значений.

Рассмотрим разные варианты получения диапазона средних значений. Для каждой величины определён диапазон, выделяемый ею из общего ряда по трём принципам:

1. отклонения от её значения в большую и в меньшую сторону на половину значения;

2. отклонения от её значения в большую и в меньшую сторону на половину размаха ряда;

3. отклонения от её значения в большую и в меньшую сторону на величину среднего линейного отклонения.

Результаты приведены в табл. 2. для среднего арифметического, медианы и межквартильного размаха.

Назовём качественными те диапазоны, которые не включают в себя первые два и последние два члена последовательности. Анализ качества диапазонов представлен в табл. 3.

Таблица 2

Диапазоны средних значений на основе среднего арифметического, медианы и межквартильного размаха

Среднее арифметическое			
Ряд	Величина отклонения		
	Половина значения	Половина размаха ряда	Среднее линейное отклонение
24 26 29 29 33 49 53 53 74 76 77 79 92 92 95	33 49 53 53 74 76 78 79	24 26 29 29 33 49 53 53 74 76 77 79 92 92	49 53 53 74 76 77 79
3 5 6 11 18 37 41 42 42 51 74 75 78 79 81	37 41 42 42 51	18 37 41 42 42 51 74	18 29 41 46 57
11 14 18 29 41 46 57 68 73 77 80 87 91 96 100	41 46 57 68 73 77 80 87	41 46 57 68 73 77 80 87	46 57 68 73 77 80
1 10 18 26 40 41 51 51 51 56 57 60 64 67 69	26 40 41 51 51 51 56 57 60 64	40 41 51 51 51 56 57 60	40 41 51 51 51 56 57 60
32 33 38 47 54 60 63 66 79 80 82 83 88 100 100	32 33 38 47 54 60 63 66 79 80 82 83 88 100 100	54 60 63 66 79 80 82 83	47 54 60 63 66 79 80 82 83
Медиана			
24 26 29 29 33 49 53 53 74 76 77 79 92 92 95	29 29 33 49 53 53 74 76 77 79	24 26 29 29 33 49 53 53 74 76 77 79	33 49 53 53 74 76
3 5 6 11 18 37 41 42 42 51 74 75 78 79 81	37 41 42 42 51	3 5 6 11 18 37 41 42 42 51 74 75 78 79 81	18 29 41 46 57
11 14 18 29 41 46 57 68 73 77 80 87 91 96 100	41 46 57 68 73 77 80 87 91 96 100	29 41 46 57 68 73 77 80 87 91 96 100	46 57 68 73 77 80 87 91
1 10 18 26 40 41 51 51 51 56 57 60 64 67 69	26 40 41 51 51 51 56 57 60 64 67 69	18 26 40 41 51 51 51 56 57 60 64 67 69	40 41 51 51 51 56 57 60 64 67
32 33 38 47 54 60 63 66 79 80 82 83 88 100 100	38 47 54 60 63 66 79 80 82 83 88	33 38 47 54 60 63 66 79 80 82 83 88	47 54 60 63 66 79 80 82 83
Межквартильный размах			
24 26 29 29 33 49 53 53 74 76 77 79 92 92 95	26 29 29 33 49 53 53 74	24 26 29 29 33 49 53 53 74 76 77 79	29 29 33 49 53 53
3 5 6 11 18 37 41 42 42 51 74 75 78 79 81	37 41 42 42 51 74 75 78 79 81	37 41 42 42 51 74 75 78 79 81	41 42 42 51 74 75 78 79 81
11 14 18 29 41 46 57 68 73 77 80 87 91 96 100	41 46 57 68 73 77 80	11 14 18 29 41 46 57 68 73 77 80 87 91 96 100	41 46 57 68 73 77 80
1 10 18 26 40 41 51 51 51 56 57 60 64 67 69	1 10 18 26 40 41	1 10 18 26 40 41 51 51 51 56 57 60 64 67	18 26 40 41
32 33 38 47 54 60 63 66 79 80 82 83 88 100 100	32 33 38 47	32 33 38 47 54 60 63 66	32 33 38 47

Первые два члена последовательности в таблице обозначены как 0, а последние два – как 99. Если диапазон включает их, ставится символ «+», а если нет, то «-».

П.зн. – отклонение на половину значения. П.р.р. – отклонение на половину размаха ряда. Ср.л.от. – отклонение на величину среднего линейного отклонения.

Единственной методикой, качественно выделившей средние диапазоны из всех рядов, является поиск значений, больших, чем разность среднего арифметического и среднего линейного отклонения, но меньших, чем их сумма.

Таблица 3

Анализ диапазонов средних значений

№ ряда	Среднее арифметическое						Медиана						Межквартильный размах					
	П. зн.		П.р.р.		Ср.л.от.		П. зн.		П.р.р.		Ср.л.от.		П. зн.		П.р.р.		Ср.л.от.	
	0	99	0	99	0	99	0	99	0	99	0	99	0	99	0	99	0	99
1	-	-	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	-	+	-	+
3	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+	+	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-
5	+	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-	+	-

Таким образом, средними для каждого коллектива будут считаться показатели агрессивности, входящие в данный диапазон, и высокими – находящиеся за его верхней границей.

Список литературы

1. Тест руки // Энциклопедия психодиагностики [Электронный ресурс] URL: https://psylab.info/Тест_руки#.D0.9E.D1.82.D0.B2.D0.B5.D1.82.D1.8B_.D0.BA.D0.B0.D1.82.D0.B5.D0.B3.D0.BE.D1.80.D0.B8.D0.B9_.C2.ABAgg.C2.BB_.D0.B8_.C2.ABDir.C2.BB (дата обращения: 16.04.2020).

2. Среднее арифметическое, размах, мода и медиана // Calcs.su [Электронный ресурс] URL: https://calcs.su/html/math/grade7/srednee-arifmeticheskoe.html (дата обращения: 16.04.2020).

3. Медиана ряда чисел // Изучаем математику вместе [Электронный ресурс] URL: https://umath.ru/calc/mediana-chisel/ (дата обращения: 16.04.2020).

4. Вариация, размах, межквартильный размах, среднее линейное отклонение // Статистический анализ в MS Excel. [Электронный ресурс] URL: https://statanaliz.info/statistica/opisanie-dannyx/variatsiya-razmakh-srednee- linejnoe-otklonenie/ (дата обращения: 16.04.2020).

5. Определение среднего значения, вариации и формы распределения. Описательные статистики // Статистика [Электронный ресурс] URL: https://baguzin.ru/wp/opredelenie-srednego-znacheniya-varia/ (дата обращения: 16.04.2020).

6. Обнаружение аномалий в данных сетевого мониторинга методами статистики // Сообщество IT-специалистов. [Электронный ресурс] URL: https://habr.com/ru/post/344762/ (дата обращения: 16.04.2020).

Проаспэт Анастасия Георгиевна, аспирант, 79647204962@mail.ru, Россия, Королёв, Московской области Технологический университет,

Кравчени Максим Сергеевич, аспирант, mkravcheni@outlook.com, Россия, Королёв, Московской области Технологический университет,

Пахомов Дмитрий Анатольевич, аспирант, wypynoBept@yandex.ru, Россия, Королёв, Московской области Технологический университет

OPTIMIZATION OF METHODS OF STATISTICAL DATA ANALYSIS IN THE STUDY OF INDICATORS AGGRESSIVENESS

A.G. Proaspat, M.C. Kravchina, D.A. Pakhomov

The result of the study of aggression indicators in the team is a set of numerical values. Further research requires a statistical assessment of the average level of aggressiveness in the group and the ability to separate the subjects whose aggressiveness indicators are increased. This research is devoted to the analysis of differences between the average values of the series obtained during the analysis of aggressiveness by the "Hand" test-an adaptation of the projective technique of E. Wagner, Z. Riotrovsky, and B. Bricklin. The optimal way to search for a range of average values of aggressiveness indicators of a group of individuals, as well as the separation of high indicators, is proposed.

Key words: mathematical statistics, variance analysis, processing of empirical research results, statistical analysis.

Proaspet Anastasia Georgievna, postgraduate, 79647204962@mail.ru, Russia, Korolyov, Moscow region Technological University,

Kravchen Maksim Sergeevich, postgraduate, mkravcheni@outlook.com, Russia, Korolev, Moscow region Technological University,

Pakhomov Dmitry Anatolyevich, postgraduate, wypynoBept@yandex.ru, Russia, Korolyov, Moscow region Technological University

УДК 621.396

ОЦЕНКА АППАРАТНЫХ ЗАТРАТ НА РЕАЛИЗАЦИЮ СОГЛАСОВАННОГО ФИЛЬТРА С ГАУССОВОЙ ФОРМОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

А.В. Петешов, А.В. Пыхтункин, В.Л. Румянцев, Д.Б. Карандин

Проведена оценка в аппаратных и вычислительных затратах при реализации алгоритмов фильтрации и параметрического обнаружения гауссовых импульсов. Определена разрядность сумматоров при итерационной фильтрации. Показано, что основные различия в аппаратурной реализации заключаются в меньшем количестве l-разрядных регистров и отсутствии умножителей при итерационном подходе.

Ключевые слова: алгоритм фильтрации, поднесущее колебание, импульсная характеристика.

В системах радиоуправления широкое распространение получила амплитудная модуляция несущей, а в качестве поднесущих колебаний – гауссовы импульсы с фиксированными параметрами [1, 2]. Поэтому актуальным является разработка алгоритмов фильтрации и параметрического обнаружения гауссовых импульсов для оптимизации аппаратных и вычислительных затрат, присущей исследуемому классу бортовой аппаратуры.

В настоящей работе предложен вариант реализации фильтрации поднесущих колебаний, обладающий близкими показателями по отношению сигнал/шум при существенно меньших аппаратных затратах по сравнению с традиционным согласованным фильтром.

Идея заключается в итерационной обработке фильтром с прямоугольной импульсной характеристикой. Согласно предельной теореме, эквивалентная импульсная характеристика такого фильтра стремится к форме гауссова импульса (рис. 1).

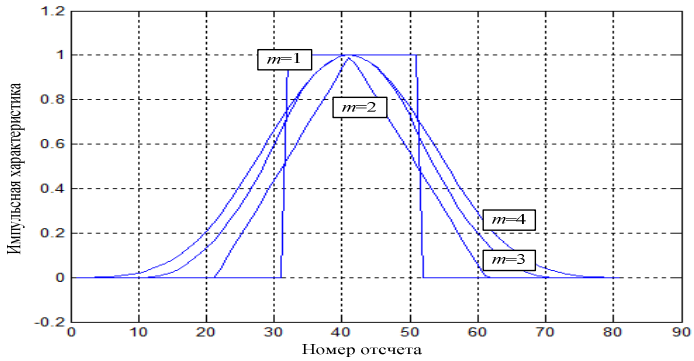


Рис. 1. Эквивалентная импульсная характеристика для разных значений количества итераций m

Предположим, что при определенном количестве итераций и длине исходной импульсной характеристики форма эквивалентной импульсной характеристики будет близка к форме поднесущего колебания на столько, что энергетические потери будут несущественными. При этом получим экономию аппаратных затрат за счет отсутствия ресурсоемких умножителей и пирамидальных сумматоров.

Определим длину и количество итераций, при которых получается максимум корреляции между заданной импульсной характеристикой в виде гауссова импульса и эквивалентной характеристикой, полученной в результате m итераций фильтрации. Эквивалентная импульсная характеристика при итерационной обработке определяется выражением [3,4]:

$$H_э(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}[H_0(f)]^m e^{jft}df = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\left[\frac{\sin(\pi f\tau_и)}{\pi f\tau_и}\right]^m e^{jft}df\,, \qquad (1)$$

где $\tau_и$, $H_0(f)$ – длительность и частотный образ прямоугольного импульса.

По результатам моделирования (1) получена зависимость нормированного СКО формы эквивалентной импульсной характеристики $H_э(t)$ и гауссова импульса $s_г(t)$ от параметра a и количества итераций m:

$$\sigma_н(a,m) = k_н\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(H_э(i) - S_г(i)\right)^2}\,, \qquad (2)$$

где $k_н$ – нормирующий коэффициент, равный максимальному значению по ненормированной матрице $\sigma_н(a,m)$.

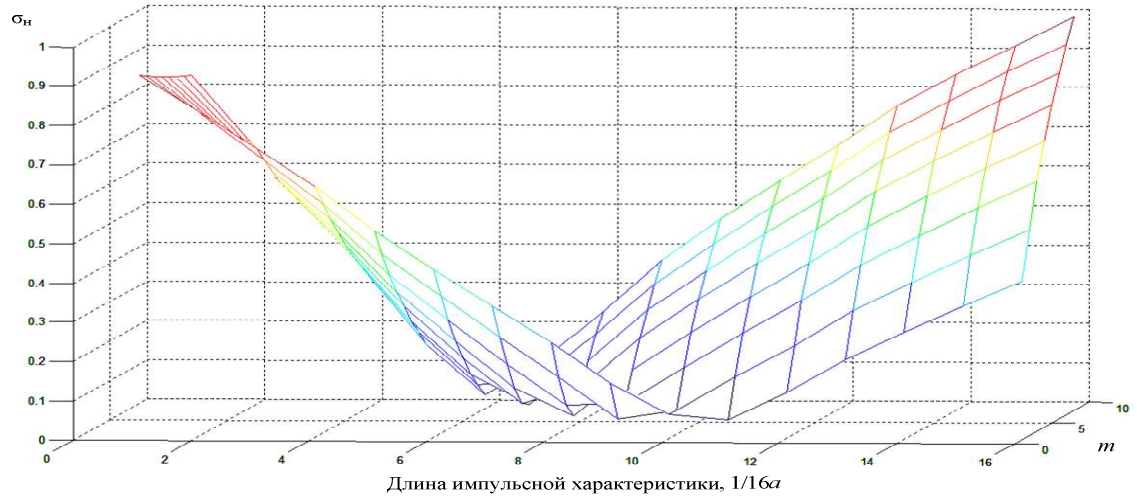


Рис. 2. СКО формы эквивалентной импульсной характеристики от гауссова импульса

Из зависимости, приведенной на рис. 2 и табл. 1 видно, что длину прямоугольной импульсной характеристики следует выбирать в интервале от 6/16a до 11/16a. При этом минимум энергетических потерь достигается при $\tau_{\text{и}} = 1/2a$ и шести итерациях. На практике требуется использовать как можно меньшее количество итераций, в этом случае необходимо использовать длины $\tau_{\text{и}} = 9/16a$ и $\tau_{\text{и}} = 11/16a$ при количестве итераций равном 4 и 3 соответственно.

Таблица 1

Значения СКО формы эквивалентной импульсной характеристики от гауссова импульса

$m\backslash\tau_{\text{и}}$	$\frac{1}{16a}$	$\frac{2}{16a}$	$\frac{3}{16a}$	$\frac{4}{16a}$	$\frac{5}{16a}$	$\frac{6}{16a}$	$\frac{7}{16a}$	$\frac{8}{16a}$	$\frac{9}{16a}$	$\frac{10}{16a}$
3	0.917	0.826	0.732	0.636	0.523	0.427	0.332	0.241	0.139	**0.060**
4	0.904	0.800	0.692	0.582	0.455	0.348	0.244	0.145	**0.037**	**0.060**
5	0.891	0.775	0.654	0.533	0.392	0.276	0.165	0.062	0.066	0.157
6	0.880	0.752	0.620	0.488	0.337	0.213	0.095	**0.024**	0.140	0.237
7	0.870	0.732	0.589	0.448	0.288	0.159	0.046	0.089	0.211	0.310
8	0.860	0.712	0.560	0.409	0.241	0.106	**0.032**	0.144	0.272	0.373
9	0.851	0.694	0.533	0.376	0.202	0.070	0.085	0.200	0.329	0.432
10	0.842	0.676	0.507	0.342	0.161	**0.034**	0.125	0.247	0.379	0.484

Разрядность сумматоров при итерационной фильтрации определяется выражением

$$l + [\log_2(0.56 * n)] + (i-1), \qquad (3)$$

где n – количество отсчетов в импульсной характеристике согласованного фильтра, i – номер итерации.

Одним из распространенных решений задачи суммирования результатов произведений отсчетов сигнала на отсчеты импульсной характеристики согласованного фильтра являет пирамидальный сумматор. При $n = 2^q$ получаем $\log_2 n$ уровней по $\log_2 n - j$ сумматоров разрядности $l + j - 1$, где $j = 1,2..\log_2 n$ – номер уровня.

Таким образом, основные различия в аппаратурной реализации заключаются в меньшем количестве l-разрядных регистров и отсутствии умножителей при итерационном подходе. Учитывая, что $n_{\min} = 8$ и $m = 4$, получаем двукратную экономию аппаратных затрат при итерационной фильтрации без рассмотрения вклада умножителей.

Список литературы

1. Быстров Р.П. Радиолокационные системы обнаружения наземных объектов в короткой части миллиметрового диапазона волн. М.: Технология, 2002. Т. 1, 2. 455 с.

2. Cherardelli H., Guillii D., Fossi M., Freni A. Adaptive polarization for rejection of ground clatter / Onde elect., № 6, 1989. P. 5-10.

3. Татаринов В.И., Лукьянов С.П. Режекторная гребенчатая фильтрация поляризационно-модулированных сигналов // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1989. Т. 32. № 5, 1989. С. 3-8.

4. Леховицкий Д.И., Атаманский Д.В., Кириллов И.Г. Разновидности сверхразрешающих анализаторов пространственно-временного спектра случайных сигналов на основе обеляющих адаптивных решетчатых фильтров // Антенны, №2. 2000. [Электронный ресурс] URL: http://eleron.net/rus/articles/Articel2LK.pdf (дата обращения: 10.02.2020).

Петешов Андрей Викторович, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры, D-john_post@mail.ru, Россия, Череповец, Череповецкое высшее военное инженерное ордена Жукова училище радиоэлектроники,

Пыхтункин Алексей Викторович, преподаватель, niri-opaii@mail.ru, Россия, Пенза, Филиал Военной академии материально-технического обеспечения,

Румянцев Владимир Львович, д-р техн. наук, профессор, заместитель начальника отдела, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тула, АО Центральное конструкторское бюро аппаратостроения,

Карандин Денис Борисович, начальник кафедры, cdbae@cdbae.ru, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тюмень, Тюменское высшее военно-инженерное командное училище имени маршала инженерных войск А.И. Прошлякова

ESTIMATION OF HARDWARE COSTS FOR IMPLEMENTING A MATCHED FILTER WITH THE GAUSSIAN FORM OF THE PULSE CHARACTERISTIC

A.V. Pleshov, A.V. Pyatunin, V.L. Rumyantsev, D.B. Karandin

The estimation of hardware and computational costs for implementing filtering algorithms and parametric detection of Gaussian pulses is carried out. Determined by the bit width of the adders in the iterative filtering. It is shown that the main differences in hardware implementation are the smaller number of l-bit registers and the absence of multipliers in the iterative approach.

Key words: filtering algorithm, subcarrier oscillation, impulse response.

Peteshov Andrey Viktorovich, candidate of technical sciences, professor, head of the Department, D-john_post@mail.ru, Russia, Cherepovets, Cherepovets Higher Military Engineering Order of Zhukov School of Radio Electronics,

Pykhtunkin Aleksey Viktorovich, teacher, niri-opaii@mail.ru, Russia, Penza, Branch of the Military Academy of Logistics,

Rumyantsev Vladimir Lvovich, doctor of technical Sciences, professor, deputy head of department, cdbae@cdbae.ru, Russia, Tula, JSC Central Design Bureau of Apparatus Engineering,

Denis Borisovich Karandin, head of department, cdbae@cdbae.ru, Russia, Tyumen, Tyumen Higher Military Engineering Command School named after Marshal of Engineering Troops A.I. Proshlyakova

УДК 621.396

МЕТОДИКА И СХЕМЫ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЁННЫХ ОТ НАДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

В.Л. Румянцев, О.Н. Акиншин, С.А. Курбатский

Представлены характеристики обнаружения надводных целей для модели помехи, основанной на К- распределении при различных ее параметрах, характеризующих состояние моря, а также характеристика обнаружения для модели помехи, основанной на Рэлеевском распределении. Определена процедура согласованной обработки радиолокационных сигналов, а также алгоритм формирования порога.

Ключевые слова: модель сигнала, радиолокационные отражения, порог обнаружения.

При выборе методики и схем обработки радиолокационных сигналов, определенный интерес представляет исследование характеристик обнаружения малоразмерных целей, наблюдаемых на фоне морской поверхности, применительно к когерентно-импульсной РЛС с высоким разрешением с учетом условий радиолокационного наблюдения, приближенных к реальным условиям окружающей среды (высота волны, направление ряби, направление ветра, скорость ветра).

Сравнение характеристик обнаружения целей, полученных для гауссовской модели помех (Рэлеевское распределение огибающей), с характеристиками для негауссовской модели, основано на К-распределении огибающей отраженного сигнала [1, 2].

Плотность распределения вероятностей (ПРВ) К-распределения имеет вид:

$$P(E) = \frac{4b^{(\mu+1)/2}E^{\mu}}{\Gamma(\mu)} K_{\mu-1}\left(2E\sqrt{b}\right), \qquad (1)$$

где μ – параметр формы К-распределения; b– масштабный коэффициент К-распределения; $K_{\mu-1}(\cdot)$ – модифицированная функция Бесселя.

На рис. 1 представлены характеристики обнаружения [1, 3, 6] для модели помехи, основанной на *K*-распределении при различных параметрах μ и b (при остальных одинаковых условиях), характеризующих различное состояние моря (кривые 2-9), а также характеристика обнаружения для модели помехи, основанной на Рэлеевском распределении (кривые 1).

На рис. 1 кривые 1 совпадает с кривой 2. Это является следствием того, что кривые Рэлеевского распределения и К-распределения при $\mu = 7$ и $b = 7$ (при остальных одинаковых условиях) близки по форме.

По рис. 1 можно сделать вывод, что при модели помехи от взволнованной морской поверхности, основанной на К-распределении, характеристики обнаружения получаются менее оптимистичными, чем при модели помехи, основанной на распределении Рэлея. Поскольку, как показано в монографии [1], К-распределение огибающей радиолокационных отражений наиболее адекватно описывает структуру принимаемых помех от поверхности для РЛС с высоким разрешением.

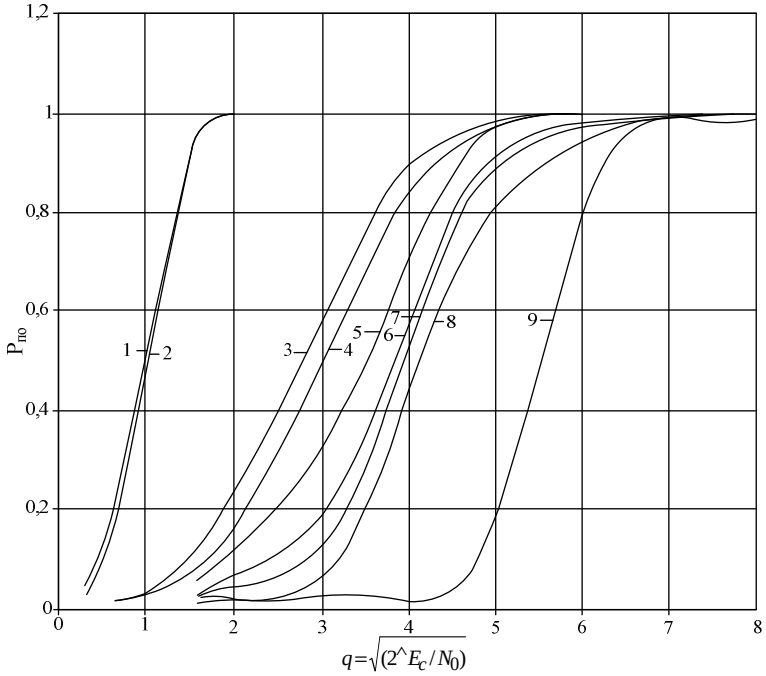


Рис. 1. Характеристики обнаружения: 1 – Рэлеевское распределение; 2 – К-распределение при μ =7 и b = 7; 3 – К-распределение при μ = 1 и b = 0,5; 4 – К-распределение при μ = 0,7 и b = 0,35; 5 – К-распределение при μ = 0,4 и b = 0,2; 6 – К-распределение при μ = 0,1 и b = 0,05; 7 – К-распределение при μ = 0,07 и b = 0,035; 8 – К-распределение при μ = 0,04 и b = 0,02; 9 – К-распределение при μ = 0,01 и b = 0,005

Характеристики обнаружения, представленные на рис. 1, были построены при следующих параметрах математической модели: доплеровский сдвиг принимаемого сигнала от цели – 0 рад/с; период повторения импульсов – $3{,}33 \cdot 10^{-5}$ с; наклонная дальность R = 5000 м; количество накапливаемых импульсов – 10; заданная вероятность ложной тревоги – 0,01.

В таблице показана вероятность правильного обнаружения шлюпки с ЭПР 1 м^2 при Рэлеевской модели помехи и при модели помехи, основанной на К-распределении [1, 2, 6]. При этом количество накапливаемых импульсов – 10, дальность до цели 2000 м, вероятность ложной тревоги – 0,01 и высота антенны над уровнем моря - 30 м. Сравнение проводится для четырех различных высот волн и при остальных одинаковых условиях.

Вероятность правильного обнаружения шлюпки

Высота волн, м		0,3	1,0	1,7	2,7
Вероятность обнаружения (P_{fa} = 0,01)	Рэлеевская модель	1	0,62	0,42	0,29
	К – распределение	0,99	0,03	0,02	0,01

Определим процедуру согласованной обработки радиолокационных сигналов, а также алгоритм формирования порога.

Соотношение для отражённых от надводных объектов представляется в виде [1, 3-5]:

$$R(\tau,f_\partial)=\int_0^T u(t)\cdot u_0(t-\tau)\cdot e^{-j\cdot 2\cdot\pi\cdot f_\partial\cdot t}dt, \qquad (2)$$

где $u(t)$– принятая реализация сигнала; $u_0(t)$а – опорный сигнал (излученный сигнал); T – время накопления сигнала; τ – задержка обнаруживаемого сигнала; f_∂ – предполагаемой доплеровское смещение обнаруживаемого сигнала.

Если в течение времени T_c изменением фазы сигнала $u(t)$ из-за доплеровского смещения можно пренебречь, то зависимость (1) преобразуется к виду:

$$R(\tau,f_\partial)=\sum_{i=0}^{N-1}\int_{T_c\cdot i}^{T_c\cdot(i+1)} u(t)\cdot u_0(t-\tau)dt\cdot e^{-j\cdot 2\cdot\pi\cdot f_\partial\cdot i}. \qquad (3)$$

Как видно из выражения (3), всю принятую реализацию сигнала можно разделить на N сегментов. Длительность сегмента T_c определяется временем, в течение которого изменением фазы сигнал из-за доплеровского смещения частоты можно пренебречь. Число N, как правило, равно результату деления числа импульсов излученного сигнала на время накопления, то есть $N = T/T_c$, а длина сегмента равна периоду сигнала. Внутренний интеграл в (3) является взаимно-корреляционная функция (ВКФ) принятого и опорного сигналов на сегменте сигнала. ВКФ может быть определена как во временной, так и в частотной области.

Внешняя сумма в (3) это дискретное преобразование Фурье:

$$R(\tau,f_\partial)=\sum_{i=0}^{N-1} R_{ci}(\tau)\cdot e^{-j\cdot 2\cdot\pi\cdot f_\partial\cdot T_c\cdot i}, \qquad (4)$$

где $R_{ci}(\tau)=\int_{T_c\cdot i}^{T_c\cdot(i+1)} u(t)\cdot u_0(t-\tau)dt$ – ВКФ излученного и принятого сигнала на одном периоде.

Входными параметрами алгоритма согласований обработки является оцифрованная реализация отраженного сигнала, а результатом обработки выступает комплексная матрица «дальность – номер доплеровского канала».

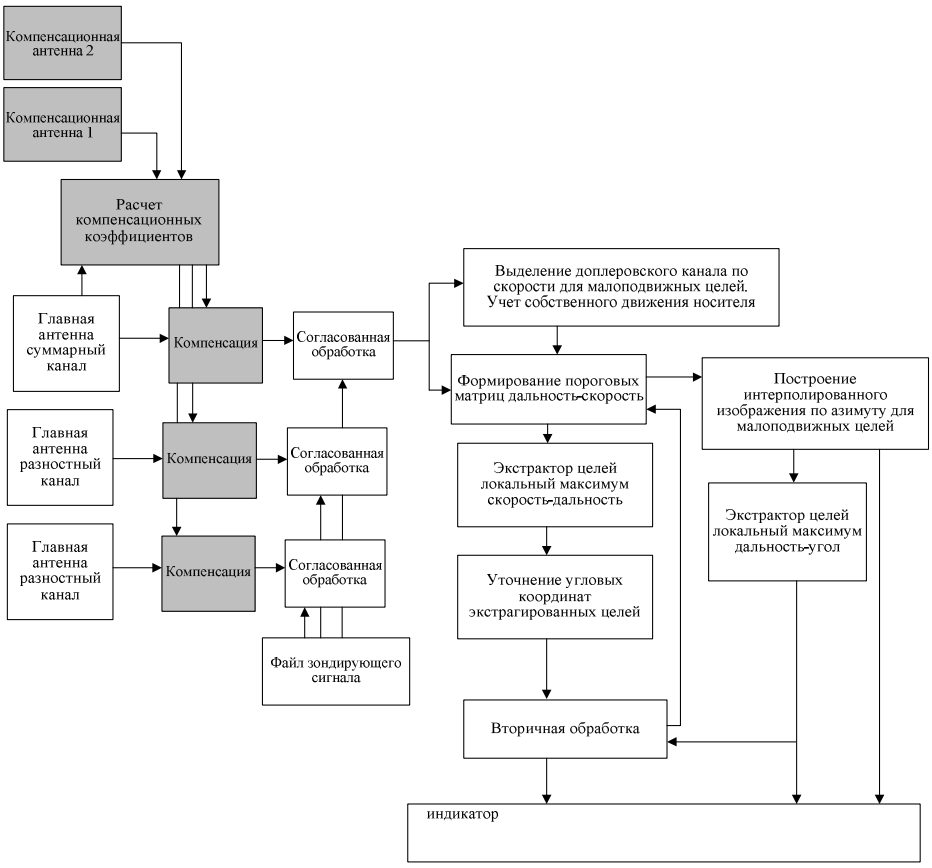


Рис. 2. Структурная схема первичной обработки с использованием суммарно разностной диаграммы

Вариант построения первичной обработки с использованием суммарно-разностной диаграммы представлен на рис. 2. Например, при частоте дискретизации 2,5 МГц, длительности сигнала 12 мс, входные данные алгоритма согласованной обработки имеют максимальный размер 30000 комплексных отсчетов.

Порог строится независимо для каждого доплеровского канала. Для сокращения объема вычислений доплеровские каналы могут быть объединены по правилу замены группы отсчетов – максимальным отсчетом.

Алгоритм вычисления порога по шумам, блок схема которого приведена на рис. 3, является статистическим квантильным. Применение квантильного метода, в отличие от усреднения, позволяет исключить влияние очень мощных, но редких выбросов в сигнале. Величина порога устанавливается в зависимости от вероятности превышения ее сигналом.

Для каждого из доплеровских каналов вычисляется нестационарная составляющая, которая является индивидуальной для каждого зондирования. Вычисляется среднее значение по рекуррентной формуле при переборе отсчетов слева и справа соответственно:

$$Sl[i] = Sl[i-1] \cdot (1-K) + u[i] \cdot K\,; \quad Sp[i] = Sp[i+1] \cdot (1-K) + u[i] \cdot K\,. \qquad (5)$$

Алгоритм расчета по рекуррентной формуле имеет недостаток: после скачка сигнала с большой амплитудой образуется зона с повышенным порогом в сторону движения вычислений.

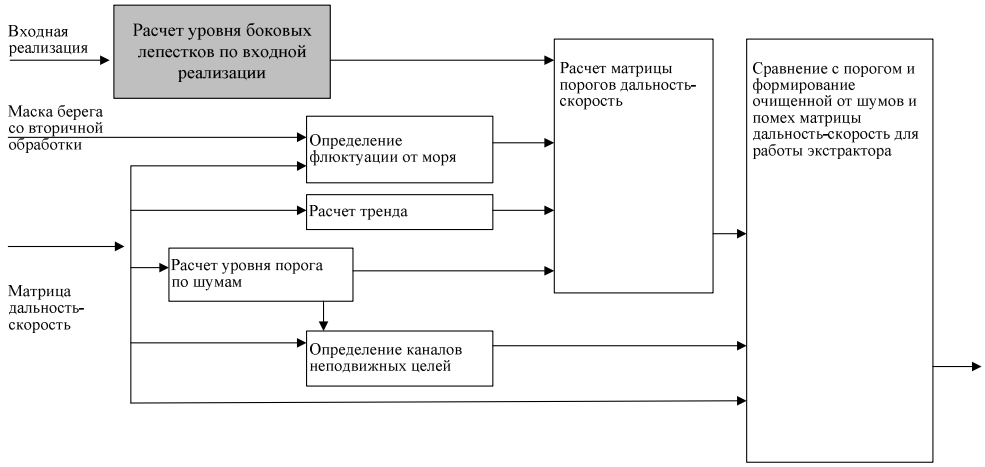


Рис. 3. Блок- схема алгоритма формирования порога

Именно поэтому производится расчет слева направо и справа налево по исходному массиву. Результирующее значение выбирается как минимальное значение из 2-х кривых.

$$Sn[i] = \min(Sp[i], Sl[i])\,. \qquad (6)$$

Таким образом, убирается зона тени перед и за одиночными крупными целями (рис. 4).

Коэффициент K определяет насколько быстро производится адаптация. Чем коэффициент K ближе к 0, тем медленнее происходит изменение уровня среднего и, следовательно, только протяженные объекты приводят к повышению уровня порога.

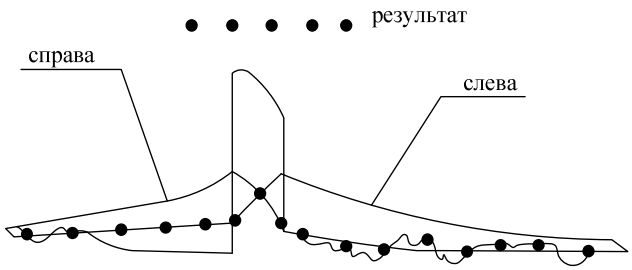


Рис. 4. Иллюстрация зоны тени перед и за одиночными крупными целями

По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

1. При малых значениях μ ошибка в определении порога может достигать значительной величины (при μ = 1,6-8 дб.)

2. Характеристики обнаружения чувствительны к виду модели, применяемой для описания помехи, при небольшом количестве накапливаемых импульсов. При накоплении больших пачек импульсов, ввиду нормализации статистики обнаружения, чувствительность к виду модели снижается.

3. Модель с Рэлеевским распределением даёт завышенные значения вероятности правильного обнаружения, по сравнению с более точной моделью, основанной на К-распределении.

4. Для построения процедур обнаружения целей на фоне морской поверхности целесообразно использовать непараметрические (ранговые) процедуры, инвариантные в виду распределения помехи.

Список литературы

1. Ward K., Tough R., Watts S. Sea clutter: scattering, the K-distribution and radar performance. 2ndedition. Croydon.: CPIGroupLtd, 2013. 586 p.

2. Румянцев В.Л., Хомяков А.В., Акиншин О.Н. Аппроксимация порога обнаружения цели на фоне отражений от морской поверхности // Сб. трудов 13 НТК "Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования земли". Сочи, 2016. С. 311-314.

3. Bocquet S. Calculation. Radar Probability of Detection in K-Distributed Sea Clutter and Noise: DSTO Defence Science and Technology Organisation, 2011. 35 p.

4. Abraham D.A. Detection-Threshold Approximation for Non-Gaussian Backgrounds // IEEE Journal of Oceanic Engineering. Vol. 35. No. 2, 2010. P. TBD.

5. Alban E.X., Magaña M.E., Skinner H.A. Low Sample Size Estimator for *K* Distributed Noise // Journal of Signal and Information Processing. 2012. No. 3. P. 293-307.

6. Милащенко Е.А., Валеев В.Г. Исследование характеристик обнаружения мелких морских целей с учетом негауссовских морских отражений // VII Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь». Сборник трудов, 2013. С. 88-92.

Румянцев Владимир Львович, д-р техн. наук, профессор, заместитель начальника отдела, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тула, АО Центральное конструкторское бюро аппаратостроения,

Акиншин Олег Николаевич, канд. техн. наук, заместитель начальника отдела, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тула, АО Центральное конструкторское бюро аппаратостроения,

Курбатский Сергей Алексеевич, начальник отделения, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тула, АО Центральное конструкторское бюро аппаратостроения

METHODS AND SCHEMES FOR PROCESSING RADAR SIGNALS REFLECTED FROM SURFACE OBJECTS

V.L. Rumyantsev, O.N. Akinshin, S.A. Kurbatsky

The characteristics of the surface target detection for noise model based on K - distribution for different parameters characterizing the sea state, as well as feature detection for noise model based on Releascom distribution. The procedure for coordinated processing of radar signals, as well as the algorithm for forming the threshold, is defined.

Key words: model of the signal and the radar reflections, a detection threshold.

Rumyantsev Vladimir Lvovich, doctor of technical sciences, professor, deputy head of department, cdbae@cdbae.ru, Russia, Tula, JSC Central Design Bureau of Apparatus Engineering,

Akinshin Oleg Nikolaevich, candidate of technical sciences, deputy head of the d epartment, cdbae@cdbae.ru, Russia, Tula, JSC Central Design Bureau of Apparatus Engineering,

Sergey Alekseevich Kurbatsky, head of the department, cdbae@cdbae.ru, Russia, Tula, JSC Central Design Bureau of Apparatus Engineering

УДК 621.396.67

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛАНАРНЫХ АНТЕНН СИСТЕМ ФИКСИРОВАННОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА

Д.Ю. Шеянов, Н.Ю. Ключко, М.Е. Елесин, А.А. Горшков

В статье исследуется возможность использования элементов теории модально-матричного анализа антенных решеток применительно к планарным антеннам. Приводится математическое описание основных энергетических характеристик планарной антенны с потерями, как многовходовой излучающей системы на базе теории диссипативных матриц физических многополюсных СВЧ-устройств. Сформулирована задача максимизации энергетических характеристик планарной антенны и аналитически обоснована возможность ее решения.

Ключевые слова: планарная антенна, коэффициент усиления, характеристика направленности, матрица рассеяния, вектор возбуждения.

Энергетическая эффективность современных радиотехнических систем, реализующих технологии фиксированного широкополосного беспроводного доступа (ШБД) в СВЧ диапазоне, во многом зависит от такой структуры применяемой планарной антенны (ПА), при которой будет решена задача достижения в фиксированной полосе рабочих частот максимального значения коэффициента направленного действия (КНД) или коэффициента усиления (КУ).

Технологически и конструктивно ПА представляет собой плоскую антенную решетку, в которой на общем металлическом рефлекторе с нанесенной на него диэлектрической подложкой, располагаются в определенном порядке и на установленном расстоянии друг от друга антенные элементы или элементарные излучатели, имеющие различную форму и соответствующие рабочему диапазону частот размеры (рис. 1). Элементарные излучатели, называемые обычно патч-элементами или патч-антеннами (*patch antenna*), выполняются с использованием микрополосковой технологии печатного монтажа. Достоинствами использования патч-элементов в массиве плоской антенной решетки являются значительная надежность, связанная с высокой точностью изготовления элементов небольших

электрических размеров, низкая стоимость производства, малый вес и простота монтажа. Однако при уменьшении электрических размеров таких антенн неизбежно возникает вопрос об эффективности их излучения и согласования с линией питания, что не позволяет добиться высокого коэффициента полезного действия (КПД) патч-излучателей в частотной полосе их использования. Основной причиной низкой эффективности электрически малых антенн является запасенная в ближней зоне реактивная энергия, доля которой увеличивается с уменьшением размеров излучателей. Теоретическим обоснованием этого является фундаментальный предел Чу-Харрингтона [1, 2], устанавливающий связь между размерами антенны и ее минимально возможной предельной добротностью.



Рис. 1. Планарная антенна системы ШБД

Сигнал на каждый патч-элемент ПА поступает с различной амплитудой и фазой в соответствии с желаемым направлением суммарного электромагнитного излучения. Поля излучающих патч-элементов с различными фазами объединяются в дальней зоне антенны, формируя диаграмму направленности необходимой ширины и формы. Эффективность излучения и согласования ПА с линией питания является основными критериями в процессе ее синтеза (разработки) и показывает насколько близко можно приблизиться к потенциальной границе допустимого значения КНД в области рабочих частот.

Таким образом, в общем случае ПА является многовходовой диссипативной излучающей системой, состоящей из одинаковых элементов и для ее математического описания и определения предельных (допустимых) энергетических характеристик целесообразно воспользоваться теорией матричного и модального анализа антенных решеток [3-5] с использованием аппарата диссипативных матриц физических многовходовых устройств [6].

Целью статьи является исследование возможности использования элементов теории модально-матричного анализа применительно к ПА систем фиксированного ШБД и аналитическое обоснование возможности решения задачи максимизации ее энергетических характеристик.

Описание планарной антенны ШБД в виде эквивалентного СВЧ многополюсника с использованием матричного аппарата. При представлении ПА в виде эквивалентного СВЧ-многополюсника (рис. 2),

соотношения между токами и напряжениями на физических входах ее элементарных патч-излучателей, обозначаемые индексом α, будут определяться матрицей сопротивлений Z в виде уравнения передачи этого многополюсника:

$$ZI\rangle = U\rangle. \tag{1}$$

Электрические характеристики ПА будет выражать матрица рассеяния S, включающая комплексные векторные характеристики направленности (ХН) по входам антенной системы из пространства (с индексами β).

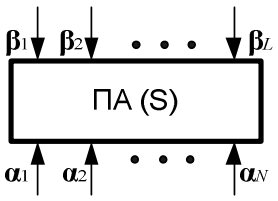


Рис. 2. Планарная антенна ШБД в виде эквивалентного СВЧ-многополюсника

Энергетические характеристики (КНД, КУ) будут определяться с использованием функционалов от матрицы рассеяния рассматриваемого эквивалентного СВЧ-многополюсника:

$$\mathrm{S} = \begin{bmatrix} \mathrm{S}_{\alpha\alpha}\mathrm{S}_{\alpha\beta} \\ \mathrm{S}_{\beta\alpha}\mathrm{S}_{\beta\beta} \end{bmatrix}. \tag{2}$$

Падающие и отраженные волны на входах ПА описываются с помощью матричного уравнения:

$$\underset{\beta}{b_\alpha}\rangle = \mathrm{S}\underset{\beta}{a_\alpha}\rangle. \tag{3}$$

Учитывая, что падающие и отраженные волны в ПА определяются напряжениями и токами на ее входах:

$$a = \frac{u+i}{2};\ b = \frac{u-i}{2}, \tag{4}$$

можно используя уравнение (1) найти, что L векторов матрицы $[i_0]$ преобразующих токов с N компонентами у каждого (N – количество элементарных патч-излучателей в ПА) создают L падающих и L отраженных от входов ПА волн (векторов):

$$\begin{cases} [a_\alpha] = \dfrac{1}{2}(\mathrm{Z} + \mathrm{E}_\alpha)[i_0]; \\ [b_\alpha] = \dfrac{1}{2}(\mathrm{Z} - \mathrm{E}_\alpha)[i_0]. \end{cases} \tag{5}$$

В этих выражениях E_α – единичная матрица порядка N; размерность матриц в квадратных скобках $N \times L$; Z – нормированная матрица сопротивлений. Входы ПА из пространства образуют L ортогональных характеристик направленности (ХН) с амплитудами отраженных волн:

$$[b_\beta] = \mathrm{S}_{\beta\alpha}[a_\alpha] \tag{6}$$

при «согласовании» с пространством, т.е. отсутствии падающих волн ($a_\beta = 0$). Размер $\mathrm{S}_{\beta\alpha} : L \times N$; $[b_\beta]$ – квадратная матрица порядка L.

Подведенная и выходная мощности для рассматриваемого эквивалентного ПА СВЧ-многополюсника (рис. 2) будут определяться следующим образом:

$$P_{\text{подв}} = \left\langle a_\alpha^* a_\alpha \right\rangle = a_\alpha^+ a_\alpha; \tag{7}$$

$$P_{\text{вых}} = \left\langle b_\beta^* b_\beta \right\rangle = b_\beta^+ b_\beta, \tag{8}$$

где знак $^+$ означает эрмитово сопряжение [7].

Потери в рассматриваемом эквивалентном ПА СВЧ-многополюснике, в соответствии с [6], можно описать с помощью матрицы диссипации:

$$\mathrm{D} = \mathrm{E} - \mathrm{S}_\Sigma^+ \mathrm{S}_\Sigma, \tag{9}$$

поскольку формула (8) с использованием блока $\mathrm{S}_{\beta\alpha}$ матрицы рассеяния (2) может быть записана в виде:

$$P_{\text{вых}} = a_\alpha^+ \mathrm{S}_{\Sigma\beta\alpha}^+ \mathrm{S}_{\Sigma\beta\alpha} a_\alpha, \tag{10}$$

мощность тепловых потерь в ПА будет составлять:

$$P_{\text{пот}} = P_{\text{подв}} - P_{\text{вых}} = a^+ \mathrm{D} a. \tag{11}$$

Коэффициент пропускания эквивалентного ПА СВЧ-многополюсника по мощности, учитывающий КПД с учетом отражений при рассогласовании патч-элементов ПА, будет определяться отношением квадратичных форм:

$$\mathrm{K} = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{подв}}} = \frac{a_\alpha^+ \mathrm{S}_{\Sigma\beta\alpha}^+ \mathrm{S}_{\Sigma\beta\alpha} a_\alpha}{a_\alpha^+ a_\alpha}. \tag{12}$$

Интенсивность поля, создаваемого ПА в дальней зоне в соответствии с [3] будет иметь вид:

$$\vec{\varepsilon}_n(\theta, \varphi) = \frac{\vec{E}_n}{\sqrt{Z_{\text{в}}}} = \vec{i}_n \sqrt{\frac{g_n r_{nn}}{4\pi}} \frac{e^{-jkr}}{r} \vec{F}_n^{\,0}(\theta, \varphi), \tag{13}$$

где $\vec{E}_n$ – электрическое поле изолированного патч-излучателя с нормированным на волновое сопротивление $Z_{\text{в}}$ током:

$$\vec{i}_n = \vec{I}_n \sqrt{Z_{\text{в}}}, \tag{14}$$

коэффициентом усиления g_n, нормированными сопротивлением r_{nn} и векторной характеристикой направленности (ХН) $\vec{F}_n^{\,0}(\theta, \varphi)$ в сферической системе координат, начало которой совмещено с центром ПА.

Из выражения (13) можно выделить ненормированную ХН ПА:

$$\vec{f}_n(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{g_n r_{nn}}{4\pi}} \vec{F}_n^{\,0}(\theta, \varphi) \tag{15}$$

и с помощью матрицы нормированных преобразующих токов $[i_0]$ размером $N \times L$ найти ортонормированные ХН элементарных патч-излучателей ПА:

$$\vec{h}(\theta,\varphi) = [i_0]\vec{f}(\theta,\varphi)\rangle \tag{16}$$

Каждый столбец токов в (16) создает одну ортогональную ХН $\vec{h}$ с единичной мощностью излучения:

$$[b_\beta] = \mathrm{E}_\beta, \tag{17}$$

где E_β – единичная матрица порядка *L*. Тогда из выражений (5) и (6), если использовать связь матрицы сопротивлений и блока матрицы рассеяния [8]:

$$\mathrm{Z} = (\mathrm{E}_\alpha - \mathrm{S}_{\alpha\alpha})^{-1}(\mathrm{E}_\alpha + \mathrm{S}_{\alpha\alpha}) \tag{18}$$

а также определение обратной матрицы:

$$\mathrm{A}^{-1}\mathrm{A} = \mathrm{A}\mathrm{A}^{-1} = \mathrm{E}, \tag{19}$$

следует, что

$$\begin{gathered}\mathrm{E}_\beta = \frac{1}{2}\mathrm{S}_{\beta\alpha}(\mathrm{Z} + \mathrm{E}_\alpha)[i_0] = \frac{1}{2}\mathrm{S}_{\beta\alpha}[(\mathrm{E}_\alpha - \mathrm{S}_{\alpha\alpha})^{-1}(\mathrm{E}_\alpha + \mathrm{S}_{\alpha\alpha}) + \\ + (\mathrm{E}_\alpha - \mathrm{S}_{\alpha\alpha})^{-1}(\mathrm{E}_\alpha - \mathrm{S}_{\alpha\alpha})][i_0] = \mathrm{S}_{\beta\alpha}(\mathrm{E}_\alpha - \mathrm{S}_{\alpha\alpha})^{-1}[i_0]\end{gathered} \tag{20}$$

Полученное матричное уравнение относительно $\mathrm{S}_{\beta\alpha}$ решается с помощью псевдообратной матрицы в скелетном представлении [7]:

$$(\mathrm{BC})^{\oplus} = \mathrm{C}^{\oplus}\mathrm{B}^{\oplus} = \mathrm{C}^{+}(\mathrm{C}\mathrm{C}^{+})^{-1}(\mathrm{B}^{+}\mathrm{B})^{-1}\mathrm{B}^{+} \tag{21}$$

где знак $^{\oplus}$ означает операцию псевдообращения, $^{+}$ – эрмитово сопряжение.

Таким образом $\mathrm{B} = (\mathrm{E}_\alpha - \mathrm{S}_{\alpha\alpha})^{-1}$, $\mathrm{C} = [i_0]$, поэтому с учетом свойства обратной матрицы [7]:

$$(\mathrm{B}^{+}\mathrm{B})^{-1} = \mathrm{B}^{-1}(\mathrm{B}^{+})^{-1} \tag{22}$$

из выражений (20) и (21) находим [5]:

$$\mathrm{S}_{\beta\alpha} = [i_0]([i_0][i_0]^{+})^{-1}(\mathrm{E}_\alpha - \mathrm{S}_{\alpha\alpha}). \tag{23}$$

Если допустить, что количество патч-излучателей по горизонтали и вертикали в массиве антенной решетки одинаково, то $[i_0]$ становится квадратной матрицей порядка *N* и выражение (23) упрощается:

$$\mathrm{S}_{\beta\alpha} = [i_0]^{-1}(\mathrm{E}_\alpha - \mathrm{S}_{\alpha\alpha}). \tag{24}$$

Из полученного блока матрицы $\mathrm{S}_{\beta\alpha}$, используя принцип взаимности можно получить:

$$\mathrm{S}_{\alpha\beta} = \mathrm{S}'_{\beta\alpha} = (\mathrm{E}_\alpha - \mathrm{S}_{\alpha\alpha})([i_0]^{*}[i_0]')^{-1}[i_0]^{*}. \tag{25}$$

Угловая зависимость интенсивности поля излучения всей ПА будет определяться путем подстановки в выражение (16) выражений (6) и (23):

$$\begin{gathered}\vec{F}(\theta,\varphi) = \left\langle b_\beta \vec{h}(\theta,\varphi)\right\rangle = \left\langle a_\alpha(\mathrm{E}_\alpha - \mathrm{S}_{\alpha\alpha})([i_0]^{*}[i_0]')^{-1}\times\right. \\ \left.\times([i_0]^{*}[i_0]')\vec{f}(\theta,\varphi)\right\rangle = \left\langle a_\alpha(\mathrm{E}_\alpha - \mathrm{S}_{\alpha\alpha})\vec{f}(\theta,\varphi)\right\rangle\end{gathered} \tag{26}$$

Данное выражение может быть записано в более компактном и чаще применяемом на практике [4] виде:

$$\vec{F}(\theta,\varphi)=\left\langle i_э \vec{f}(\theta,\varphi)\right\rangle. \quad (27)$$

В этом представлении угловой зависимости интенсивности излучения ПА используется вектор нормированных токов на физических входах патч-излучателей ПА с учетом их взаимного влияния:

$$\left\langle i_э=\left\langle a_\alpha(\mathrm{E}_\alpha-\mathrm{S}_{\alpha\alpha}\right).\right. \quad (28)$$

Задача максимизации КУ (КНД) планарной антенны ШБД. Как известно [8] основным энергетическим параметром любой антенной системы, в том числе и планарной, является ее коэффициент усиления (КУ), представляющий собой отношение векторов Пойтинга в дальней зоне для рассматриваемой антенны и идеальной изотропной антенны при одинаковых мощностях на входах этих антенн:

$$G=\frac{\left|\vec{\varepsilon}_n\right|\cdot 4\pi r^2}{\mathrm{P}_{\text{подв}}}. \quad (29)$$

Используя выражения (13) и (27) для угловой зависимости интенсивности излучения ПА, выражение для ненормированной ХН ПА (15) и учитывая, что мощность, излученная током с плотностью $\vec{J}$ описывается выражением [4, 5]:

$$P=(\vec{J}^*,\overline{\overline{R}}\vec{J}), \quad (30)$$

где $\overline{\overline{R}}$ – положительно определенный оператор матрицы сопротивлений Z:

$$\overline{\overline{R}}=\frac{1}{2}(\overline{\overline{Z}}+\overline{\overline{Z}}^{+}) \quad (31)$$

можно получить угловую зависимость КУ ПА на базе матричного аппарата:

$$G(\theta,\varphi)=\frac{4\pi\left\langle i^*\vec{f}^*(\theta,\varphi)\right\rangle\left\langle\vec{f}(\theta,\varphi)i\right\rangle}{\left\langle i^*\mathrm{r}i\right\rangle}. \quad (32)$$

В этом выражении $i\rangle$ – вектор нормированных токов в произвольно выбранных взаимовлияющих патч-элементах ПА с соответствующими ненормированными ХН $\vec{f}(\theta,\varphi)$ в общей системе координат (рис. 3). При подстановке в это выражение вектора (28) и формулы для подводимой к ПА мощности (7) можно определить КУ ПА в терминах падающих волн мощности и матрицы рассеяния с учетом рассогласования ПА с генераторами:

$$G(\theta,\varphi)=\frac{4\pi\left\langle a_\alpha^*(\mathrm{E}_\alpha-\mathrm{S}_{\alpha\alpha})^{+}\vec{f}^*(\theta,\varphi)\right\rangle\left\langle\vec{f}(\theta,\varphi)(\mathrm{E}_\alpha-\mathrm{S}_{\alpha\alpha})a_\alpha\right\rangle}{\left\langle a_\alpha^* a_\alpha\right\rangle}. \quad (33)$$

Разность единичной матрицы E_α и блока $\mathrm{S}_{\alpha\alpha}$ можно определить из формулы (24) через блок $\mathrm{S}_{\beta\alpha}$ матрицы рассеяния (2) и матрицу преобразующих токов. С помощью выражения (15) при использовании единичного вектора возбуждения ПА ее КУ можно записать в виде функционала [3]:

$$G(\theta,\varphi)=\mathrm{S}^{+}_{\beta\alpha}\overline{\overline{g}}(\theta,\varphi)\mathrm{S}_{\beta\alpha} \tag{34}$$

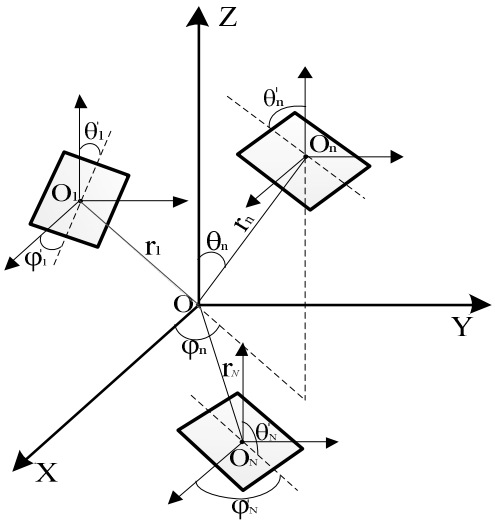


Рис. 3. Совокупность патч-элементов ПА в сферической системе координат

Матричный КУ патч-элементов ПА будет представлять собой тензор второго ранга:

$$\overline{\overline{g}}(\theta,\varphi)=\sqrt{g_n}\vec{F}_n^{*}(\theta,\varphi)\Big\langle\vec{F}_n(\theta,\varphi)\sqrt{g_n}=\overline{\overline{g}}_{\theta}(\theta,\varphi)+\overline{\overline{g}}_{\varphi}(\theta,\varphi) \tag{35}$$

Аналогично известному [8] соотношению КУ с КНД и КПД:

$$G=D\eta \tag{36}$$

используя выражения (34) и (12) при единичном векторе возбуждения ПА можно определить ее матричный КНД:

$$D(\theta,\varphi)=\frac{\mathrm{S}^{+}_{\beta\alpha}\overline{\overline{g}}(\theta,\varphi)\mathrm{S}_{\beta\alpha}}{\mathrm{S}^{+}_{\beta\alpha}\mathrm{S}_{\beta\alpha}}. \tag{37}$$

Очевидно, что в случае использования не единичного возбуждения ПА числители и знаменатели в выражениях (34) и (37) необходимо будет умножить слева на вектор-строку $\left\langle a^{*}_{\alpha}\right.$, а справа – на вектор-столбец $\left.a_{\alpha}\right\rangle$.

В общем случае для решения задачи максимизации КНД необходимо найти вектор $\vec{J}$, дающий решение:

$$\begin{cases}\max\left\langle\overline{\overline{F}}\tilde{\vec{J}}\tilde{\vec{J}}\right\rangle,\\ P_{\text{подв}}=\text{const},\end{cases} \tag{38}$$

где $\overline{\overline{F}}$ – неотрицательный оператор, действующий по правилу:

$$\overline{\overline{F}}\vec{J}=\left\langle\vec{J}\vec{F}_{\theta}\right\rangle\vec{F}_{\theta}+\left\langle\vec{J}\vec{F}_{\varphi}\right\rangle\vec{F}_{\varphi} \tag{39}$$

Если ПА создает поле с θ-й или φ-й поляризацией (рис. 3), то из формулы для угловой зависимости интенсивности поля в дальней зоне [3]:

$$F(\theta,\varphi)=F_{\theta}\vec{e}_{\theta}+F_{\varphi}\vec{e}_{\varphi} \tag{40}$$

следует, что максимальный КНД (КУ) достигается на распределении тока, возбуждающем требуемую поляризацию поля. Вектор $\vec{F}(\theta,\varphi)$ $\vec{F}(\theta,\varphi)$ должен при этом иметь вид:

$$\vec{F}(\theta,\varphi)=\delta(\theta-\theta_0)\,\delta(\varphi-\varphi_0)(A\vec{e}_\theta+B\vec{e}_\varphi), \tag{41}$$

где A и B – комплексные постоянные, обуславливающие поляризацию поля излучения; δ – непрерывный линейный функционал (пробная функция).

Учитывая выражения (29) и (32) КУ ПА может быть представлен в следующем виде:

$$G(\theta,\varphi)=\frac{\left\langle \overline{\overline{F}}\vec{J}\vec{J}\right\rangle}{P_{\text{изл}}+P_{\text{пот}}}. \tag{42}$$

Нахождение токов $\tilde{J}$ в патч-излучателях, дающих максимально возможный КУ ПА, сводится к отысканию экстремума данного выражения. Для этого рассмотрим соотношение, обратное выражению (42):

$$G^{-1}=\frac{P_{\text{изл}}}{\left\langle \overline{\overline{F}}\vec{J}\vec{J}\right\rangle}+\frac{P_{\text{пот}}}{\left\langle \overline{\overline{F}}\vec{J}\vec{J}\right\rangle}=D^{-1}+P_R^{-1}, \tag{43}$$

где D – величина КНД ПА в соответствии с выражением (36); P_R – отнесенная к мощности потерь излученная мощность. Из данного соотношения вытекает формула:

$$G=\frac{D}{1+D/P_R}, \tag{44}$$

из которой следует, что задачу оптимизации КУ ПА можно решить в два этапа. На первом этапе максимизируется КНД (КУ ПА без потерь), на втором – отношение D/P_R. При отсутствии джоулевых потерь в ПА $P_R\to\infty$ и $G=D$, а при их возрастании величина КУ снижается.

Рассмотрим несколько вариантов решения задачи по нахождению оптимального КУ ПА. Из выражений (33) и (15) величина КУ в направлении (θ,φ) для ПА с N идентичными патч-излучателями, может быть определена:

$$G(\theta,\varphi)=\frac{\left|\sum_{n=1}^{N}a_{\alpha_n}\sqrt{g_n}\vec{F}_n(\theta,\varphi)\right|^2}{\sum_{n=1}^{N}\left|a_{\alpha_n}\right|^2}. \tag{45}$$

Для нахождения вектора возбуждения a_α, дающего максимальный КУ ПА в направлении точки приема (θ_0,φ_0) необходимо рассмотреть неравенство Коши-Буняковского [3]:

$$G(\theta_0,\varphi_0)\le\frac{\sum_{n=1}^{N}\left|a_{\alpha_n}\sqrt{g_n}\vec{F}_n(\theta_0,\varphi_0)\right|^2}{\sum_{n=1}^{N}\left|a_{\alpha_n}\right|^2}. \tag{46}$$

Равенство будет иметь место при фазировке на сложение полей патч-элементов ПА в направлении точки приема (θ_0, φ_0), когда фазы компонентов вектора возбуждения компенсируют разности хода плоской волны в патч-излучателях относительно опорного (совмещенного с центром общей системы координат для ХН $\vec{F}_n$):

$$\arg a_{\alpha_n} + \arg \vec{F}_n(\theta_0, \varphi_0) = 0 \qquad (47)$$

Дальнейшая максимизация КУ ПА по отношению к падающим волнам a_{α_n} при фиксированной подводимой мощности (знаменателе (45)) возможна путем обеспечения максимума проекций вещественных векторов $\left|a_{\alpha_n}\right|>$ (n = 1, 2, …, N) на векторы $\vec{F}_n(\theta_0, \varphi_0)$. Это достигается, когда векторы параллельны [9], т.е.

$$a_{\alpha_n} = C\left|\vec{F}_n(\theta_0, \varphi_0)\right|, \qquad (48)$$

где C – постоянная, не зависящая от n.

Из выражений (47) и (48) вытекает решение для вектора возбуждения, позволяющее получить максимальный КУ ПА:

$$a_{\alpha_n} = CF_n^*(\theta_0, \varphi_0). \qquad (49)$$

Подставив это выражение в формулу (45) можно определить величину максимального КУ ПА:

$$G_{\max}(\theta_0, \varphi_0) = \sum_{n=1}^{N}\left|\sqrt{g_n}F_n(\theta_0, \varphi_0)\right|^2 = \sum_{n=1}^{N} g_n(\theta_0, \varphi_0). \qquad (50)$$

Рассмотрим возможность оптимизации полного КПД ПА, зависящего от согласования генератора с входами излучающих патч-элементов ПА. Входная мощность ПА определяется выражением:

$$P_{\text{вх}} = \left\langle a_\alpha^* a_\alpha \right\rangle - \left\langle b_\alpha^* b_\alpha \right\rangle = \left\langle a_\alpha^* (\mathrm{E} - \mathrm{S}_{\alpha\alpha}^+ \mathrm{S}_{\alpha\alpha}) a_\alpha \right\rangle \qquad (51)$$

При согласовании генератора нормированный вектор возбуждения $(a_\alpha^* a_\alpha = 1)$ можно разложить в ортонормированном базисе $t\rangle$:

$$a_\alpha = \sum_{n=1}^{N} t_n \left\langle t_n^* a_\alpha \right\rangle = \sum_{n=1}^{N} A_n t_n. \qquad (52)$$

Если векторы t_n являются собственными для матрицы $\mathrm{S}_{\alpha\alpha}^+\mathrm{S}_{\alpha\alpha}$ с собственными значениями s_n, то полный КПД ПА можно записать в виде:

$$\eta(a_\alpha) = \sum_{n=1}^{N}\left|A_n\right|^2 (1 - \left\langle t_n^* \mathrm{S}_{\alpha\alpha}^+ \mathrm{S}_{\alpha\alpha} t_n \right\rangle) = \sum_{n=1}^{N}\left|A_n\right|^2 (1 - s_n). \qquad (53)$$

В частном случае [3] нормальной матрицы $\mathrm{S}_{\alpha\alpha}$ получим:

$$\eta(a_\alpha) = \sum_{n=1}^{N}\left|A_n\right|^2 (1 - \left|\tilde{s}_n\right|)^2, \qquad (54)$$

где $\tilde{s}_n$ – собственные значения матрицы $\mathrm{S}_{\alpha\alpha}$.

Таким образом, из полученных выражений (53) и (54), вытекает возможность оптимизации вектора возбуждения для получения максимально полного КПД ПА. При учете тепловых потерь в ПА, в соответствии с при-

веденными выше выражениями (42) и (44) оптимальная величина КУ ПА будет всегда меньше, чем максимально возможный КНД. Выражение (50), являющееся по своей физической сути интерпретацией принципа сложения полей [8, 10], показывает, что предельное усиление ПА равно в этом случае сумме КУ отдельных излучающих патч-элементов ПА.

Заключение. В контексте использования матричной теории антенных решеток и теории модального анализа для математического описания планарных антенн систем фиксированного ШБД сформулирована задача максимизации их энергетических характеристик и аналитически обоснована возможность ее решения. При представлении ПА в виде диссипативной электродинамической системы с помощью модально-матричного аппарата появляется возможность определения ее предельных электрических и энергетических характеристик. В общем случае задача оптимизации энергетических характеристик ПА в терминах падающих волн мощности и матрицы рассеяния эквивалентного диссипативного СВЧ многополюсника решается в два этапа: на первом максимизируется КНД (КУ ПА без потерь), на втором отношение КНД к излучаемой ПА мощности отнесенной к мощности ее потерь.

В качестве дальнейшей перспективы развития изложенных в статье элементов модально-матричного анализа применительно к ПА предполагается исследование вопросов оптимизации среднего КУ по угловой зоне или коэффициента концентрации излучения в заданной частотной области применения ПА.

Список литературы

1. Панченко Б.А., Нефедов Е.И. Микрополосковые антенны. М.: Радио и связь, 1986. 144 с.

2. Каценеленбаум Б.З., Войтович Н.Н., Коршунова Е.Н. и др. Электродинамика антенн с полупрозрачными поверхностями: Методы конструктивного сннтеза / под ред. Б.З. Каценеленбаума, А.Н. Сивова. М.: Наука, 1989. 176 с.

3. Фитенко Н.Г. Анализ и синтез модульных антенн. Л.: ВАС, 1990. 141 с.

4. Сазонов Д.М. Основы матричной теории антенных решеток // Сб. научно-методических статей по прикладной электродинамике. М.: Высшая школа, 1983. Вып. 6 С. 111-162.

5. Фитенко Н.Г. Представление матрицы рассеяния излучающей системы в базисе характеристических полей // Вопросы расчета и проектирования антенн и радиолиний / под ред. В.П. Серкова. Л.: ВАС, 1987. С. 123-130.

6. Воропаев Ю.П. Характеристические параметры многополюсника СВЧ // Сб. научно-методических статей по прикладной электродинамике. М.: Высшая школа, 1978. Вып. 2 С. 80-100.

7. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1988. 552 с.

8. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высшая школа, 1988. 432 с.

9. Фитенко Н.Г. Исследование работы антенной решетки в режиме вычитания излучений в парах элементов // Вопросы расчета и проектирования антенн и радиолиний / под ред. В.П. Серкова. Л.: ВАС, 1987. С. 101-105.

10. Сосунов Б.В., Филиппов В.В., Фитенко Н.Г. Принципы построения и вопросы теории фазированных антенных решеток. Л.: ВАС, 1981. 48 с.

Шеянов Дмитрий Юрьевич, канд. техн. наук, сотрудник, sdmtr-80@mail.ru, Россия, Орел, Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Ключко Николай Юрьевич, канд. техн. наук, сотрудник, sdmtr-80@mail.ru, Россия, Орел, Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Елесин Максим Евгеньевич, канд. техн. наук, сотрудник, sdmtr-80@mail.ru, Россия, Орел, Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Горшков Алексей Анатольевич, канд. техн. наук, сотрудник, sdmtr-80@mail.ru, Россия, Орел, Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации

ENERGY EFFICIENCY OF PLANAR ANTENNAS OF FIXED BROADBAND WIRELESS ACCESS SYSTEMS

D.Y. Sheyanov, N.Y. Klyuchko, M.E. Elesin, A.A. Gorshkov

In the article possibility of use of elements of the theory of the modal-matrix analysis of antennas arrays with reference to planar antennas is investigated. The mathematical description of the basic power characteristics of the planar aerial with losses, as multiport radiating system on the basis of the theory dissipative matrixes of physical multipolar microwave devices is resulted. The problem of maximization of energy characteristics of the planar antennas is formulated and possibility of its decision is analytically proved.

Key words: planar antennas, gain, directivity characteristic, scattering matrix, excitation vector.

Sheyanov Dmitriy Yurievich, candidate of technical sciences, employee, sdmtr-80@mail.ru, Russia, Orel, Academy of Federal Security Service of Russia,

Klyuchko Nikolay Yurievich, candidate of technical sciences, employee, sdmtr-80@mail.ru, Russia, Orel, Academy of Federal Security Service of Russia,

Elesin Maksim Evgenyevich, candidate of technical sciences, employee, sdmtr-80@mail.ru, Russia, Orel, Academy of Federal Security Service of Russia,

Gorshkov Aleksey Anatolyevich, candidate of technical sciences, employee, sdmtr-80@mail.ru, Russia, Orel, Academy of Federal Security Service of Russia

УДК 621.394

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНИКИ СВЯЗИ

С.С. Семенов, О.А. Губская

В статье предложен подход к оцениванию эффективности системы мониторинга технического состояния техники связи. Обоснован перечень частных показателей эффективности системы мониторинга.

Ключевые слова: техника связи, система мониторинга, эффективность, сбор информации.

Исходя из определения мониторинга технического состояния техники связи, как «информационное обеспечение органов военного управления (ОВУ), осуществляемое подсистемой контроля технического состояния техники связи (ТС), соединениями (воинскими частями) и предприятиями промышленности при выполнении государственных контрактов по сервисному обслуживанию образцов техники связи» [1], можно сделать вывод, что мониторинг является процессом по сбору и обработке информации.

Основной целью мониторинга является обеспечение выработки и принятия решений в ОВУ (по вопросам технического обеспечения связи и автоматизации).

Для этого в рамках мониторинга технического состояния решаются следующие задачи: сбор информации, ее систематизация; анализ информации.

Данные задачи решаются для информации о: °

степени функциональной готовности образцов ТС к применению (использованию по назначению);

степени обеспеченности войск (сил) техникой и имуществом связи, техническом состоянии образцов ТС, организации эксплуатации и ремонта образцов ТС, состоянии ремонтно-восстановительных органов;

качестве и своевременности проведения плановых работ по техническому обслуживанию и ремонту ТС.

Таким образом можно сформировать таблицу задач и требуемой информации, а на пересечении показатели, которые могут характеризовать выполнение данной задачи применительно к данной информации, то есть перечень частных показателей эффективности выполнения задач (таблица).

Полнота охвата техники $K_{\text{пт}}$, характеризует насколько охвачена сбором информации техника:

$$K_{\text{пт}} = \frac{N_{\text{тс}}}{N_{\text{уч}}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{тс}}$ – количество техники по которой информация собрана; $N_{\text{уч}}$ – количество техники, числящейся на учете.

Перечень частных показателей эффективности выполнения задач

Информация о:	Задачи		
	сбор	систематизация	анализ
степени функциональной готовности образцов ТС к применению	Полнота охвата техники, $K_{\text{пт}}$	Полнота охвата показателей, $K_{\text{пкз}}$	Готовность парка техники, $K_{\text{гот}}$
степени обеспеченности войск(сил) техникой и имуществом связи	Полнота охвата подразделений, $K_{\text{пп}}$	Достоверность (непротиворечивость с имеющимися данными), $K_{\text{дост}}$	Обеспеченность, $K_{\text{обесп}}$
техническом состоянии образцов ТС	Полнота охвата техники, $K_{\text{пт}}$	Достоверность (непротиворечивость с имеющимися данными), $K_{\text{дост}}$	Готовность парка техники, $K_{\text{гот}}$
организации эксплуатации и ремонта образцов ТС	Полнота охвата техники, $K_{\text{пт}}$	Достоверность (непротиворечивость с имеющимися данными), $K_{\text{дост}}$	Наличие отработанных документов, $K_{\text{док}}$
состоянии ремонтно-восстановительных органов	Полнота охвата подразделений, $K_{\text{пп}}$	Укомплектованность, $K_{\text{укомпл}}$	Ресурс (количество возможных ремонтов), $N_{\text{рем}}$
качестве и своевременности проведения плановых работ по техническому обслуживанию и ремонту ТС	Полнота охвата техники, $K_{\text{пт}}$	Плановость, $K_{\text{план}}$	Своевременность, $K_{\text{св}}$

Полнота охвата подразделений $K_{\text{пп}}$, характеризует насколько охвачены сбором информации подразделения:

$$K_{\text{пп}} = \frac{N_{\text{соб}}}{N_{\text{под}}}, \tag{2}$$

где $N_{\text{соб}}$ – количество подразделений по которым собрана информация; $N_{\text{под}}$ – общее количество подразделений.

Полнота охвата показателей $K_{\text{пкз}}$, характеризует полноту получения показателей, требуемых для принятия решений (проведения анализа):

$$K_{\text{пкз}} = \frac{N_{\text{пол}}}{N_{\text{треб}}}, \tag{3}$$

где $N_{\text{пол}}$ – количество полученных показателей; $N_{\text{треб}}$ – требуемое количество показателей.

Готовность парка техники $K_{\text{гот}}$, характеризует степень готовности техники связи к применению:

$$K_{\text{гот}} = \frac{N_{\text{раб}}}{N_{\text{общ}}}, \tag{4}$$

где $N_{\text{раб}}$ – количество работоспособной ТС; $N_{\text{общ}}$ – общее количество ТС.

Достоверность (непротиворечивость с имеющимися данными) $K_{\text{дост}}$, характеризует степень доверия полученным данным по результатам сравнения с имеющейся информацией:

$$K_{\text{дост}} = \frac{N_{\text{несовп}}}{N_{\text{совп}}}, \quad (5)$$

где $N_{\text{несовп}}$ – количество объектов, информация о которых не совпадает с имеющейся; $N_{\text{совп}}$ – количество объектов, информация о которых совпадает с имеющейся.

Обеспеченность – степень обеспечения подразделений ТС:

$$K_{\text{обесп}} = \frac{N_{\text{тс}}}{N_{\text{шт}}}, \quad (6)$$

где $N_{\text{тс}}$ – количество имеющейся ТС; $N_{\text{шт}}$ – штатное количество ТС.

Наличие отработанных документов – степень обеспеченности правильно отработанными документами:

$$K_{\text{док}} = \frac{N_{\text{пр}}}{N_{\text{тр}}}, \quad (7)$$

где $N_{\text{пр}}$ – количество правильно отработанных документов; $N_{\text{тр}}$ – требуемое количество документов.

Укомплектованность – степень укомплектованности специалистами:

$$K_{\text{укомп}} = \frac{N_{\text{спец}}}{N_{\text{шт}}}, \quad (8)$$

где $N_{\text{спец}}$ – количество специалистов в ремонтном органе; $N_{\text{шт}}$ – штатная численность специалистов.

Ресурс (количество возможных ремонтов) – возможности ремонтно-восстановительных органов по проведению ремонтов.

$N_{\text{рем}}$ – возможное количество проводимых ремонтов, расчет имеет смысл проводить только в самом органе, расчеты на других уровнях буду не корректны.

Плановость – характеризует соответствие ремонтов и технического обслуживания планирующим документам:

$$K_{\text{план}} = \frac{N_{\text{план}}}{N_{\text{общ}}}, \quad (9)$$

где $N_{\text{план}}$ – количество ремонтов и технических обслуживании по плану; $N_{\text{общ}}$ – общее количество ремонтов и технических обслуживаний.

Своевременность – характеризует соответствие выполнения мероприятий запланированным временным отрезкам:

$$K_{\text{св}} = \frac{N_{\text{св}}}{N_{\text{общ}}}, \quad (10)$$

где $N_{\text{св}}$ – количество своевременно проведенных работ; $N_{\text{общ}}$ – общее количество проведенных работ.

Обобщенным показателем системы мониторинга можно считать цикличность – период времени между циклами сбора информации. Данный показатель, согласно исследований, должен быть в 2 раза меньше, чем

период принятия решений. Таким образом, если по каким-то вопросам необходимо принимать решения каждый месяц, то сбор необходимой для этого информации должен осуществляться 2 раза в месяц.

Основным показателем эффективности системы мониторинга можно считать оперативность – время от начала сбора информации до получения результатов анализа, данный показатель не рассчитывается, а измеряется:

$$T_{\text{вост}} = T_{\text{деф}} + T_{\text{орг}} + T_{\text{уб}} + T_{\text{рем}} + T_{\text{воз}}, \quad (11)$$

где $T_{\text{деф}}$ – время на первичную дефектацию (определение отказа и невозможности провести ремонт самостоятельно – текущий ремонт); $T_{\text{орг}}$ – время на организационные потери (формирование заявки на ремонт, отправка запроса, получение подтверждения и т.п.); $T_{\text{уб}}$ – время на доставку отказавшей техники к месту проведения ремонта (либо время на прибытие ремонтной бригады); $T_{\text{рем}}$ – время проведения ремонта; $T_{\text{воз}}$ – время на возвращение отремонтированной техники к месту эксплуатации (в случае выездной бригады $T_{\text{воз}} = 0$).

Таким образом, система мониторинга позволяет повлиять на общее время восстановления через $T_{\text{орг}}$, за счет постоянного контроля прохождения отказавшей техники по этапам. Проводить расчеты или замеры по каждому этапу отдельно.

Так как перед системой восстановления стоит задача максимально быстро восстанавливать ТС, то есть $T_{\text{вост}} \to 0$, то оценить эффективность системы мониторинга можно через сравнение времени восстановления до внедрения системы и после.

Разница между этими значениями и будет показывать эффективность

$$K_{\text{эф}} = \frac{T_{\text{вост}}^{\text{до}}}{T_{\text{вост}}^{\text{после}}}, \quad (12)$$

где $K_{\text{эф}}$ - коэффициент эффективности.

Список литературы

1. ГОСТ РВ 0101–001–2007. Эксплуатация и ремонт изделий военной техники. Термины и определения, 2007.

2. Приказ МО РФ от 28.12.2013 года № 969 «Об утверждении Руководства по содержанию вооружения и военной техники общевойскового назначения, военно-технического имущества в Вооруженных Силах Российской Федерации», 2013.

Семенов Сергей Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, semsem@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Губская Оксана Александровна, адъюнкт, oksanochka23932393@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного

METHODOLOGY FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF THE SYSTEM FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF COMMUNICATIONS EQUIPMENT

S.S. Semenov, O.A. Gubskaya

The article offers an approach to evaluating the effectiveness of the monitoring system of the technical state of communication technology. The list of particular indicators of the monitoring system's effectiveness is substantiated.

Key words: communication technology, monitoring system, efficiency, information collection.

Semenov Sergey Sergeevich, doctor of technical sciences, professor, semsem@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,

Gubskaya Oksana Aleksandrovna, adjunct, oksanochka23932393@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny

УДК 622.23.05

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ И ПОДАЧИ ДОЛОТА БУРОВОГО СТАНКА СБШ-250МН-32Т

Т.Л. Фам

Описано применение буровых станков, использующихся в Группе Угольной и Минеральной Промышленности Вьетнама - ВИНАКОМИН. Проанализированы особенности пород на карьерах Вьетнама, которые имеют коэффициент крепости от 4 до 12 по шкале проф. М.М. Протодьяконова. Показана необходимость исследования и разработки новой системы автоматического управления скоростью вращения и подачи долота бурового станка в соответствии с условиями карьера.

Ключевые слова: буровая станка, скорость вращения долота, скорость подачи долота, система автоматического управления.

Буровая работа на карьерах является важным производственным процессом при проведении взрывных работ, влияющим на производительность выемки горных пород. Процесс бурения является довольно сложным процессом, и существует множество технических параметров машины, которые влияют на процесс бурения.

В процессе бурения необходимо контролировать три основных параметра регулирования: скорость вращения долота, усилие подачи долота и количество сжатого воздуха или промывочной жидкости для удаления разрушенных пород из забоя. Количество и качество сжатого воздуха или промывочной жидкости обычно является достаточными для обеспечения очистки забоя. Таким образом, в процессе бурения остаются только два основных параметра: скорость вращения долота (n) и усилие подачи (F_n) которые нужно контролировать (рис. 1) [1].

В горном районе Куанг Нинь карьеры Вьетнама имеют сложные геологические условия, а именно: физико-механические свойства горных пород и их крепость изменяются в широких пределах. Это и является одной из основных причин, непосредственно вызывающих вибрацию буровой штанги станка.

Вибрацию во время бурения можно рассматривать как результат установки скорости вращения и усилия подачи бурения. В некоторые современные машины компании-производители встроили датчики измерения вибрации непосредственно в изделие. Информация о мгновенной вибрации или средней вибрации буровой штанги используется в качестве косвенной обратной связи по измерению твердости породы во время бурения для контроля параметров бурения и оптимизации производительности процесса [1-4, 6].

Целью данной работы является исследование и разработка системы автоматического управления скоростью вращения долота и силой подачи бурового станка СБШ-250МН-32Т.

1. Механическая структура рабочего органа буровой машины СБШ-250МН-32Т. Кинематическая схема рабочего органа буровой машина СБШ-250МН-32Т приведена на рис. 1. Механизм включает в себя: 1 – электродвигатель постоянного тока; 2 – редуктор вращателя; 3 – шинно-шлицевая муфта; 4 – опорный узел; 5 – четырехкратная канатно-полиспастная система подачи; 6 – колонна вращающихся штанг; 7 – гидроцилиндр подачи; 8 – механизм свинчивания-развинчивания штанг [4, 5].

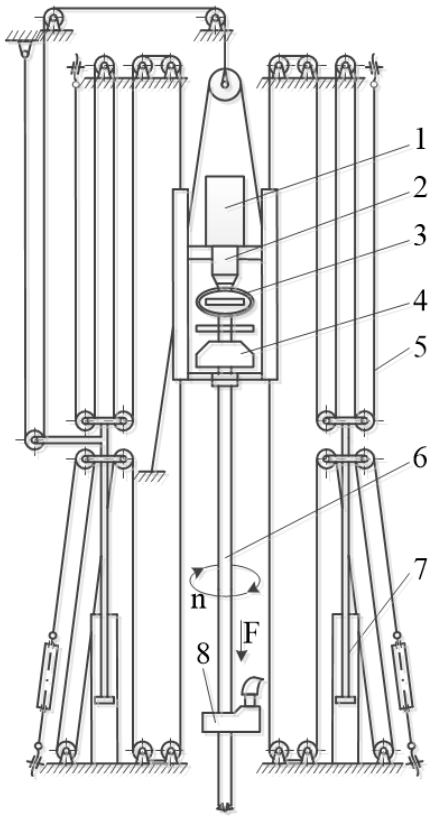


Рис. 1. Кинематическая схема вращательно-подающего механизма станка СБШ-250МН-32Т

Для управления долотом существуют два механизма: поворотный механизм и механизм гидравлического сжатия [1].

Вращение производится от электродвигателя постоянного тока. Скорость вращения двигателей постоянного тока регулируется устройством управления ТПЕ-200-460-Y2.1. Эта скорость передается через редуктор (с соотношением 1: 16/187) на опорный узел 4 шинно-шлицевой муфтой 3.

Сжатие осуществляется гидравлическим насосом, который подает рабочую жидкость в гидроцилиндр 7. Усилие гидроцилиндра 7 уменьшается в четыре раза и передается на опорный узел 4 четырехкратной канатно-полиспастной системы подачи.

На рис. 2 приведена структура рабочего органа и систем, обеспечивающих рабочие режимы его функционирования. На схеме использованы следующие обозначения: *МС* – мостовая схема выпрямителя; *МС В* – мостовая схема выпрямителя возбудителя; Ⓜ – электродвигатель постоянного тока; *М* – электро-двигатель; ⊖ – гидравлический насос; ⇢ – информация; ⇢ – управление; ▬ механическая связь.

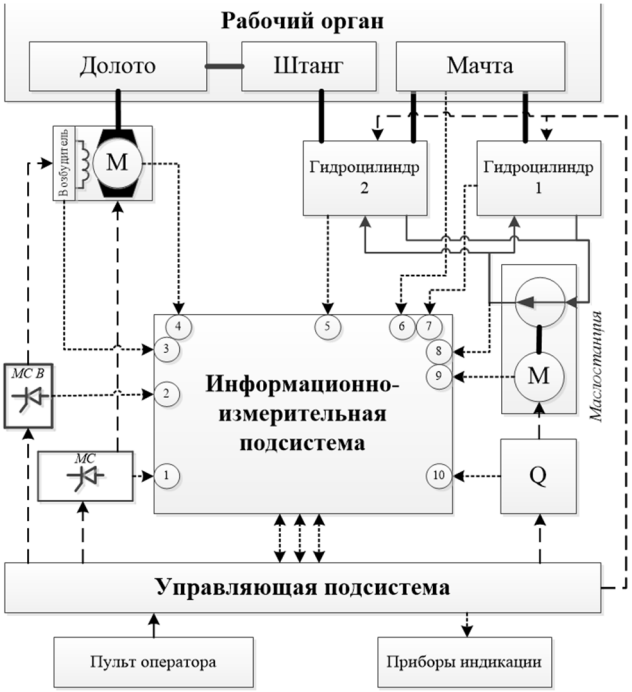


Рис. 2. Структура рабочего органа и вспомогательных систем

Скорость вращения, крутящий момент и направление вращения двигателя постоянного тока контролируются двумя трехфазными мостовыми выпрямительными системами, *МС* и *МС В*. Угол мачты бурильной штанги обеспечивается гидравлическим цилиндром 1. Движущая сила вращающейся штанги обеспечивается гидравлическим цилиндром 2.

Режим работы рабочего органа бурового станка обеспечивается электродвигателем постоянного тока и гидроцилиндром 2. Таким образом, для разработки системы управления режимом бурения необходимо исследовать систему управления двумя электродвигателями.

Для обеспечения эффективного управления процессом разрушения горной породы информационно-измерительная подсистема с помощью соответствующих датчиков собирает сенсорную информацию о состоянии отдельных элементов бурового станка: *1* – напряжение; 2 – ток; *3*, *4*, *9* – температура; *5*, *7* – линейное перемещение; *6* – угол поворота мачты; *8* – давление в гидроприводе; *10* – on/off; описание сигналов.

Как видно, состав информационных сигналов, регистрируемых и обрабатываемых информационно-измерительной системой, может быть расширен. С другой стороны, для оценки состояния породоразрушающего долота необходимо добавить сигнал о твердости разрушаемой породы.

2. Управление механизмом вращения и подачи долота. Функциональная схема системы управления вращением показана на рис. 3. Жирными линиями показаны силовые цепи, а тонкими линиями показаны сигнальные цепи [1, 4].

На рис. 3 использованы следующие обозначения: *K1* – автомат; *Q1* – контакторы; *L1…L3* – катушки индуктивности; *TA* – трансформатор тока; ДТ – датчик тока; *PT* – регулировка тока; ДН – датчик напряжения; СУР – суммарный усилитель регулировки; МС – трехфазная мостовая схема выпрямителя; СИФУ – система импульсно-фазового управления; *M* – двигатель постоянного тока; *Q3* – контакторы; МСВ – мостовая схема выпрямителя возбудителя; СУВ – суммарный усилитель возбудителя; СИФУВ – система импульсно-фазового управления возбудителем.

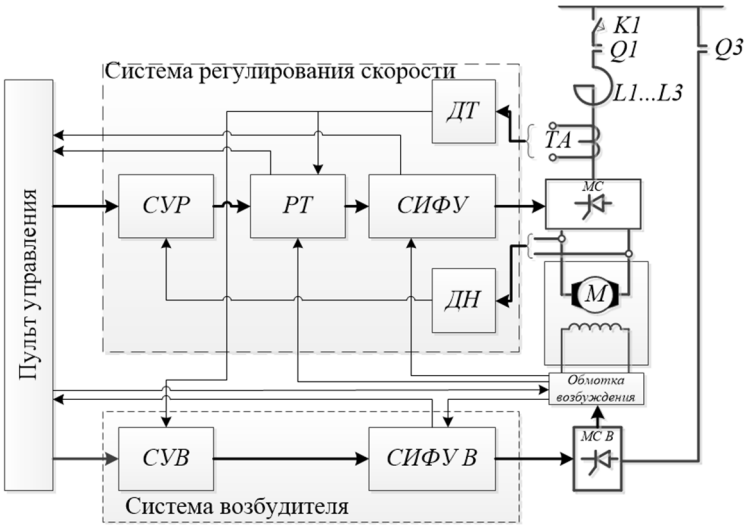


Рис. 3. Функциональная схема системы управления двигателем вращения долота

Система управленния механизмом вращения долота работает следующим образом.

Вращение долота при работе бурильного станки СБШ-250МН-32Т производится двигателем постоянного тока *M*, катушка возбуждения которого подключена к выходу трехфазного мостового выпрямителя *МС*. Скорость электродвигателя зависит от выходного напряжения мостового выпрямителя *МС*, которое определяется контроллером *СИФУ*. Катушка воз-

будителя подключена к выходу трехфазного мостового выпрямителя *МС В*. Направление вращения долота, а также крутящий момент определяются возбудителем двигателя постоянного тока *М*.

Оператор устанавливает скорость вращения с пульта управления. На основании заданной скорости и сигнала обратной связи по напряжению от датчика напряжения *ДН, СУР* минус отклонение управления. Результатом расчета является сигнал управления скоростью, отправляемый на регулятор тока.

Для обеспечения работы двигателя постоянного тока при мощности, не превышающей номинальную мощность, *РТ* принимает сигнал обратной связи от *ДТ* в сочетании с сигналом управления скоростью, полученным от *СУР*, в рассчитывает угол α. Угол альфа-контроля соответствует выходному напряжению *МС*.

Оператор устанавливает ток возбуждения с пульта управления. На основании заданного тока возбуждения и тока обратной связи от датчика *ДТ*, усилитель *СУВ* передает сигнал управления альфа-углом на контроллер *СИФУВ*. Угол α соответствует выходному напряжению трехфазного мостового выпрямителя *МС В*. Это напряжение изменяется линейно относительно тока в обмотке возбуждения. Направление вращения электродвигателя также является направлением обмотки возбуждения, которое выбирается с пульта управления посредством приведения в действие возбудителя. Направление обмотки возбуждения контролируется двумя контакторами тока вкмоленкими в цель питания обмотки.

Блоки обозначенные на рис. 3, выполняют следующие функции:

Регулятор тока *РТ* является нелинейным регулятором. Он выполняет функцию цифровой *ПИ*-регулятора для регулировки тока и дополнительно обеспечивает:

быстрое ограничение тока при номинальном режиме (заданное значение предотвращает внезапные изменения нагрузки при любой скорости);

своевременую подачу импульса, когда сигнал в *РТ* уменьшается или теряется, пропорционально значению входного сигнала;

стабилизацию работы привода в постоянном токовом режиме, а также в режиме прерывистого тока.

Система импульсно-фазового управления *СИФУ* представляет собой набор каналов управления и служат для того, чтобы привести тиристоры в рабочее состояние. *СИФУ* имеет 6 каналов и возбуждения следующие функции:

генерирование управляющих импульсов и сдвига фаз в соответствии с управляющими сигналами. На каждом выходе канала имеется два управляющих импульса с длительностью импульса 400 μс; отклонение между ними составляет 60^{o} электрических;

ограничение входного сигнала между максимальными и минимальными значениями (ограничение максимального и наименьшего угла открытия тиристоров α_{max}, α_{min}) с целью реализации предела изменения требований к импульсным фазам управления;

усиление и формирование управляющих импульсов для открытия и закрытия тиристоров.

Функциональная схема системы управления подачей долота показана на рис. 4, где использованы следующие обозначения: *K1* – автомат; *Q1* – контакторы; *ТА* – трансформатор тока; *ДТ* – датчик тока; *М* – двигатель [1, 4].

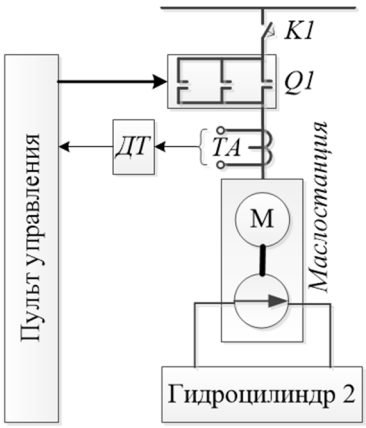


Рис. 4. Схема системы управления подачей долота

Система управленния механизмом подачи долота работает следующим образом.

Скорость вращения двигателя *М* контролируется контактором *Q1*. Мотор *М* имеет три уровнями управления скоростью: 750 об / мин, 1500 об / мин и 3000 об / мин. Которые выбирает оператор с помощью контактора *Q1*. Тяговый гидравлический насос с электродвигателем, обеспечивает усилие сжатия 30 тонн. Гидроцилиндр 2, движущийся вверх или вниз, управляется путем изменения направления вращения электродвигателя *М*.

3. Оценка существующей системы управления режимами. Из приведенного выше анализа системы управления скорости и подачи долота видно, что существующая система имеет много конкретных преимуществ, а именно:

простой режим работы, не требует сложной системы управления, рабочие после простого процесса обучения могут быстро управлять бурабую машину;

ускорение и ограничение значений пускового момента электродвигателя бурового станка на любой скорости;

регулировка скорости двигателя в соответствии с необходимой функцией сигналов;

стабилизация скорости двигателя в пределах от 0 до номинального значения;

автоматическое регулирование магнитного потока двигателя путем регулировки тока в обмотке возбуждения для увеличения или уменьшения скорости вращения двигателя с использованием полной мощности системы привода.

Наряду с достоинствами система имеет следующие недостатки:

оператор работает полностью пассивно. В процессе управления машиной он не распознает, как буровое долото проходит через слои породы с различной крепостью, чтобы соответствующим образом изменять режим бурения;

в системе управления скорости должна быть разработана система автоматического управления, скорость должна соответствовать твердости породы в скважине;

необходимо разработать датчик, который косвенно определяет твердость породы в буровых скважинах посредством вибрации долота;

из-за управления тремя различными уровнями скорости давление, создаваемое гидроцилиндром 2, не изменяется непрерывно;

необходимо изменить механизм управления электромагнитным двигателем с помощью контактора (имеет три выбора регулировки скорости) для использования частотный преобразователь.

По вышеуказанным причинам предлагается новая интегрированная система управления скоростью вращения и подачи долота бурового станка с принципиальной схемой, показанны на рис. 5, 6 и 7 [2-4, 6].

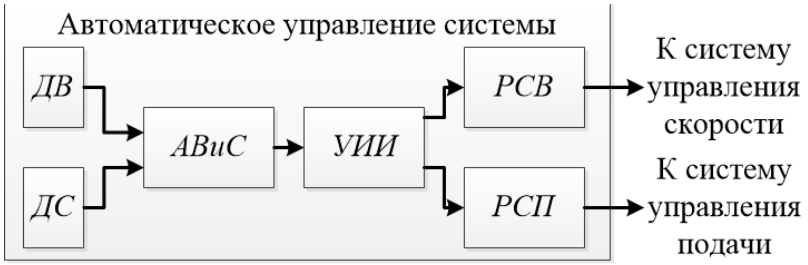


Рис. 5. Структурная схема системы автоматического управления

На рис. 5 в систему автоматического управления добавлены два датчика: вибрации *ДВ* и определения скорость *ДС* долота. Анализатор вибрации и скорости *АВиС* принимает измеренный сигнал от двух датчиков. Это и преобразуется в сигнал обратной связи на управление искусственным интеллектом *УИИ*. По полученному сигналу обратной связи контроллер искусственного интеллекта рассчитывает и выдает два сигнала двум регуляторам: регулирует скорость вращения *РСВ* и регулирует степень подачи *РСП*.

Новое управление выполнять следующие функции:

расчет измерение вибрации и скорости сверла, управлять скоростью вращения и скоростью подачи долота;

обеспечивать выполнение необходимых функций прежней системой;

сокращать время реакции на управление скоростью вращения и скоростью долота.

Новое управление добавлен между позицией управляющего сигнала от пульта управления, чтобы выбрать скорость врашения и подачи долота. Наряду с этим есть переключатель для выбора автоматического или ручного режима управления.

Выводы. В результате исследования системы автоматического управления скоростью вращения и подачи долота бурового станка можно сделать следующие выводы:

измерение вибрации бурового долота является совершенно новым методом для косвенного определения крепости горных пород в зонах бурения на карьерах;

исследование метода определения крепости горных пород в зонах бурения на карьерах посредством вибрации буровых долот совершенно необходимо для повышения эффективности контроля технологического процесса бурения.

Список литературы

1. Тхао Н.Д. Исследование и разработка системы автоматизации процессов бурения скважин для взрывной разработки месторождений полезных ископаемых: дис…канд. техн. наук. М.: Московский ордена трудового красного знамени горный институт, 1971. 147 с.

2. Кантович Л.И., Козлов С.В., Муминов Р.О. Обоснование и выбор параметров вращательно-подающего механизма карьерного бурового станка // Горный информационно-аналитический бюллетень. М., 2011. № 5. С. 225-229.

3. Dung L.N., Chi D.V. Application of neural network and fuzzy logic to design fuzzy compensation controller for rotation speed control system to reduce vibration on СВШ-250Т bridge drilling machine // Mining science and technology magazine. Hanoi., 2020. № 2. P. 15-16.

4. Hai P.A. Research and application of new electric drive control techniques for some opencast mining equipment // P.A. Hai, P.T. Liem [etc] // Thesis.Tech.Science. Institute of Mining Science & Technology. Hanoi. 2016. 120 p.

5. Шигин А.О. Буровые станки для открытых горных работ: станки типа СБШ-250: учебно-методическое пособие для самостоятельных работ. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013. 19 с. [Электронный ресурс] URL: https://ru.b-ok.cc/book/3604085/fa1113 (дата обращения: 10.02.2020).

6. Хамзаев А.А., Хайдарова М.Э. Разработка наиболее эффективной схемы управления привода вращателя бурового станка СБШ-250 МН-32, в условиях карьера «Мурунтау» // Молодой ученый., Казань: 2016. №14. С. 195 - 199. [Электронный ресурс] URL: https://moluch.ru/ archive/ 118/32862/ (дата обращения: 10.02.2020).

7. Шигин А.О., Гилев А.В., Шигина А.А. Методология проектирования адаптивных вращательно-подающих органов буровых станков и технологий их применения в сложноструктурных породных массивах // Сетевое научное издание. М.: Академия Естествознания, 2017. 265 с. [Электронный ресурс] URL: https://monographies.ru/en/book/view?id=692 (дата обращения: 10.02.2020).

Фам Тхань Лием, аспирант, phamthanhliem1982@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DEVELOPMENT AUTOMATION SYSTEM CONTROL ROTATION SPEED AND BITS FEED RATE IN THE DRILLING MACHINE SBSH-250MN-32T

Pham Thanh Liem

The application of drilling rigs used in the Coal and Mineral Industry Group of Vietnam - VINAKOMIN is described. The features of the rocks in the quarries of Vietnam, which have a coefficient of strength from 4 to 12 on the scale of prof. M.M. Protodyakonova. The necessity of research and development of a new system for automatic control of rotation speed and feed of a drill bit in accordance with the conditions of the quarry is shown.

Key words: drilling machine, rotation speed bit, bit feed rate, automation system control.

Pham Thanh Liem, postgraduate, phamthanhliem1982@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

УДК 622.2

ВЫДЕЛЕНИЯ РАДОНА В АТМОСФЕРУ СТРОЯЩИХСЯ ТОННЕЛЕЙ

Г.В. Стась, В.И. Голик, Р.А. Ковалев, Апете Гоку Ландри

Источником выделения радона в породном массиве является рассеянный уран, поэтому источник можно считать равномерно распределенным в горном массиве. Так как период полураспада урана в зависимости от вида изотопа может составлять от $2{,}48\cdot10^5$ до $4{,}51\cdot10^9$ лет, то интенсивность источника выделений радона в поры и трещины горного массива можно принять величиной постоянной. Разработанный алгоритм и комплекс программных средств для расчета выделений радона в тоннели позволяют автоматизировать процесс проектирования систем вентиляции тоннелей, где радоновыделения являются значимым газовым фактором.

Ключевые слова: радон, тоннель, диффузия, сорбция, горный массив, удельная активность, воздух.

Физическая модель и математическое описание вертикальной миграции радона в горные выработки. Выделение радона в атмосферу тоннелей происходит, главным образом, вследствие двух физических процессов, а именно – диффузии газа через горные породы и его выделение из твердой фазы горных пород (десорбция) [1 – 3]. Диффузионный поток радона от источника его образования в соответствии с законом Фика можно записать в виде [4 – 5]:

$$\mathbf{j}_{Rn} = -D_{Rn}\,\mathrm{grad}\left[C_{Rn}(z,t)\right], \qquad (1)$$

где $\mathbf{j}_{Rn}$ – вектор диффузионного потока; D_{Rn} – коэффициент эффективной диффузии радона; C_{Rn} – концентрация радона в породах, расположенных над залежью урана.

Рассмотрим произвольный объем породы V, ограниченный внешней поверхностью F, в котором находится радон [6 – 8]. Количество радона, проходящего через поверхность F, определяется поверхностным интегралом: $-\oiint_F \mathbf{j}_{Rn} dF$. Тогда изменение всей массы радона в объеме V в единицу времени будет равно: $\frac{\partial}{\partial t}\iiint_V (M+q)\,dV$, где M, q – масса свободного и сорбированного радона в единичном объеме породы.

Из закона сохранения массы следует, что $-\oiint_F \mathbf{j}_{Rn} dF + \iiint_V \frac{\partial}{\partial t}(M+q)dV = 0$. Преобразовав первое слагаемое этого равенства по формуле Остроградского - Гаусса, получим,

$$-\iiint_V \operatorname{div}(\mathbf{j}_{Rn})\,dV + \iiint_V \frac{\partial}{\partial t}(M+q)\,dV = 0. \qquad (2)$$

Так как объем V выбран произвольно, то условие (2) выполняется в том числе, если в нем алгебраическая сумма подынтегральных выражений равна нулю.

Тогда уравнение баланса массы радона при его диффузии в пористой сорбирующей среде примет вид:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial t} = \operatorname{div}\left\{D_{Rn}\operatorname{grad}\left[C_{Rn}(z,t)\right]\right\}. \qquad (3)$$

Вторым уравнением, характеризующим перенос радона в породах, является уравнение кинетики процесса взаимодействия газообразного вещества с твердой фазой.

Основным процессом взаимодействия газа с твердой фазой является сорбция. В общем случае скорость процесса зависит от количества радона в газовом потоке и сорбированном состоянии, коэффициента диффузии и скорости потока. Эта зависимость в неявном виде записывается следующим образом:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = f\left[M(C_{Rn}), q(C_{Rn}), V(C_{Rn}), D_{Rn}\right]. \qquad (4)$$

Из соотношения (4) следует, что скорость сорбции определяется как сорбционной способностью породы, так и внешними воздействиями, изменяющими диффузионное сопротивление твердой фазы и влияющими на интенсивность диффузионного газового потока. Уравнение газового состояния имеет вид: $\rho = f(C_{Rn})$.

Уравнение диффузионной кинетики десорбции можно представить следующим образом:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \beta_{Rn}\left[M(C_{Rn}) - q'(C_{Rn})\right], \qquad (5)$$

где $q'(C_{Rn})$ – масса сорбированного газа, соответствующая равновесному состоянию для текущего значения концентрации радона C_{Rn}; β_{Rn} – константа скорости диффузии.

Величины $M(C_{Rn})$, $q'(C_{Rn})$ в явном виде можно записать следующим образом:

$$M(C_{Rn}) = m\rho(C_{Rn}) = m\rho_{Rn0}\left(\frac{C_{Rn}}{C_{Rn0}}\right)^{1/n}; \quad (6)$$

$$q'(C_{Rn}) = \frac{abC_{Rn}}{1+aC_{Rn}}, \quad (7)$$

где C_{Rn0}, ρ_{Rn0} – соответственно начальная концентрация и плотность радона; a, b – экспериментальные постоянные изотермы Лэнгмюра; n – показатель политропы (при n = 1 имеем изотерму; при n = 1,41 - адиабату). Значение константы скорости диффузии β_{Rn} будет различным для процессов, протекающих во внешне- и внутридиффузионной областях.

Если процесс протекает в смешанной диффузионной области, то:

$$\frac{1}{\beta_{Rn}} \approx \frac{1}{\beta_{Rn1}} + \frac{1}{\beta_{Rn2}}, \quad (8)$$

где β_{Rn1}, β_{Rn2} – константы скорости диффузии для внешне- и внутридиффузионной области соответственно.

Введем потенциальную функцию диффузии:

$$C = \int_0^p \rho(C_{Rn})\,dC_{Rn} = \lambda c C_{Rn}^{1+1/n}, \quad (9)$$

где $\lambda = n/(n+1)$; $c = \rho_{Rn0} C_{Rn0}^{-1/n}$.

Тогда с учетом выражения (9) скорость изменения массы свободного радона в макропорах можно записать в виде:

$$\frac{\partial M(C_{Rn})}{\partial t} = m\frac{\partial \rho(C_{Rn})}{\partial t} = m\frac{d\rho}{dC_{Rn}}\frac{\partial C_{Rn}}{\partial t} = \frac{m\rho_{Rn0}}{C_{Rn0}}\frac{\partial C_{Rn}}{\partial t}. \quad (10)$$

Принимая диффузионные характеристики пород постоянными, и учитывая, что движение радона во вмещающих породах можно считать одномерным, получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial^2 C_{Rn}}{\partial z^2} = \frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dC_{Rn}} + \frac{\partial q}{\partial t}, \quad (11)$$

где z – вертикальная координата, вдоль которой направлен диффузионный поток радона из надработанной урановой залежи.

Математическая модель радоновыделения в воздух тоннеля из горного массива. Источником выделения радона в горном массиве является рассеянный уран, поэтому источник можно считать равномерно распределенным в плоскости горного массива. Так как период полураспада

урана в зависимости от вида изотопа урана может составлять от $2{,}48\cdot10^5$ до $4{,}51\cdot10^9$ лет, то интенсивность источника радоновыделения в поры и трещины горного массива можно принять величиной постоянной.

Радон, оказавшийся в свободном состоянии, диффундирует по порам и трещинам к поверхности обнажения горного массива. Этот процесс сопровождается частичной сорбцией радона и его естественным радиоактивным распадом. Определить однозначно вид диффузионного переноса невозможно и разумно предположить, что одновременно протекают процессы молекулярной, кнудсеновской и фольмеровской диффузии.

Следовательно, диффузионное сопротивление будет определяться величиной коэффициента эффективной диффузии радона в горном массиве. Такая физическая модель движения радона в горном массиве позволяет использовать хорошо изученное уравнение диффузии для описания, рассматриваемого процесса. Математическая модель процесса имеет следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}C_{Rn} = D\frac{\partial^2}{\partial x^2}C_{Rn} + J_{Rn} - \lambda_{Rn}C_{Rn} - K_c\left(K_p C_{Rn\,p} - C_{Rn}\right); \qquad (12)$$

$$C_{Rn}\Big|_{t=0} = C_{Rnн} = \text{const};\ C_{Rn}\Big|_{x=0} = C_{Rn^*} = \text{const};\ \lim_{x\to\infty} C_{Rn} \neq \infty; \qquad (13)$$

где C_{Rn} – концентрация свободного радона в порах и трещинах горного массива; D – коэффициент эффективной диффузии радона в горном массиве; J_{Rn} – источник выделения радона в поры и трещины горного массива в результате радиоактивного распада урана; K_c – константа скорости сорбции радона веществом горного массива; K_p – константа равновесия процесса сорбции радона веществом горного массива; $C_{Rn\,p}$ – равновесная концентрация радона в твердой фазе; $C_{Rn\,н}$ – начальная концентрация радона, находящегося в свободном состоянии.

Решение этой краевой задачи можно получить одним из известных методов. Используя решение уравнения (12) для условий (13), получим следующую зависимость для определения скорости радоновыделения I_{Rn} с поверхности обнажения горного массива:

$$I_{Rn} = \sqrt{D}\left[\frac{C_{Rn\,н} - C_{Rn^*}}{\sqrt{\pi t}}\exp\left(-\lambda t\right) + \left(\frac{J_{Rn}}{\sqrt{\lambda}} - C_{Rn^*}\sqrt{\lambda}\right)\operatorname{erf}\sqrt{\lambda t}\right]. \qquad (14)$$

Анализ зависимости показывает, что скорость радоновыделения, уменьшаясь во времени, достаточно быстро стремиться к постоянному значению: $I_{Rn^*} = \lim_{t\to\infty} I_{Rn} = \text{const}$. В состоянии динамического равновесия скорость радоновыделения определяется по формуле:

$$I_{Rn^*} = J_{Rn}\sqrt{D/\lambda} - C_{Rn^*}\sqrt{D\lambda}\,. \qquad (15)$$

Для того, чтобы определить общее количество радона, поступающего в тоннель, величину I_{Rn^*} следует умножить на суммарную площадь обнажения горного массива.

Для автоматизации инженерно-технического расчета интенсивности радоновыделения в шахтные вентиляционные выбросы разработана программа на объектно-ориентированном языке Borland Delphy 8.0 Architect Edition.

Для расчета необходимо сформировать информационный блок исходных данных, включающий следующие параметры:

$\underline{D}$ – коэффициент эффективной диффузии радона в горных породах, м^2/с;

λ – постоянная радиоактивного распада радона;

J_{Rn} – источник выделения радона в поры и трещины горного массива, Бк/м^3·с;

C_{Rn^*} – равновесная концентрация радона в твердой фазе, Бк/м^3;

S – площадь поверхности обнажения горного массива, м^2;

$L_к$ – длина дренажного канала, м;

$S_к$ – площадь поперечного сечения дренажного канала, м^2;

$J_{Rn}\big|_{\xi=0}$ – удельная активность радона, выделяющегося в воздух из единицы объема воды в точке $\xi = 0$, Бк/м^3·с;

$J_{Rn}\big|_{\xi=L_к}$ – удельная активность радона, выделяющегося в воздух из единицы объема воды в точке $\xi = L_к$, Бк/м^3·с.

Расчет интенсивности радоновыделения из горного массива ведется по формуле (15). Расчет радоновыделения из горного массива производится по формуле: $I_{Rn} = I_{Rn^*} \cdot S$, Бк/с.

Расчет интенсивности радоновыделения из подземных шахтных вод ведется по формуле: $I_{Rn}^{в} = \left(j_{Rn}\big|_{\xi=0} - j_{Rn}\big|_{\xi=L_к} \right) S_к L_к$, Бк/с. Интенсивность радоновыделения в атмосферу тоннеля составит: $I_{\Sigma Rn} = I_{Rn} + I_{Rn}^{в}$, Бк/с.

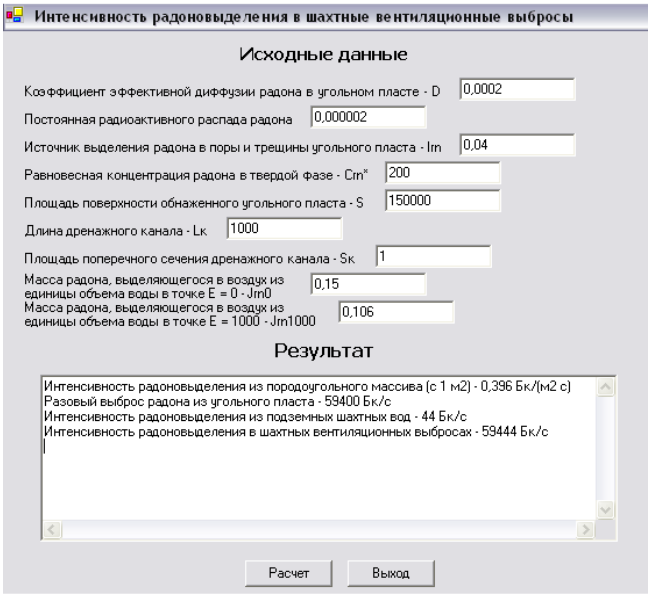


Рис. 1. Программный модуль для расчета интенсивности выделения радона в атмосферу тоннеля

Щелчком курсора на знаке файла «Project1.exe» вызывается форма программного модуля, показанная на рис. 1. Затем вносят в соответствующие окна исходные данные и нажимают «Расчет».

Математические модели прогнозирования содержания радона в атмосфере тоннеля и расчет количества воздуха. Диффузионный перенос радона воздухом в тоннеле происходит в стационарном режиме. Учитывая соотношения поперечных размеров и длины тоннеля целесообразно рассматривать одномерную конвективно-турбулентную диффузию.

Расчетная схема конвективно-турбулентного диффузионного переноса радона в тоннеле представлена на рис. 2.

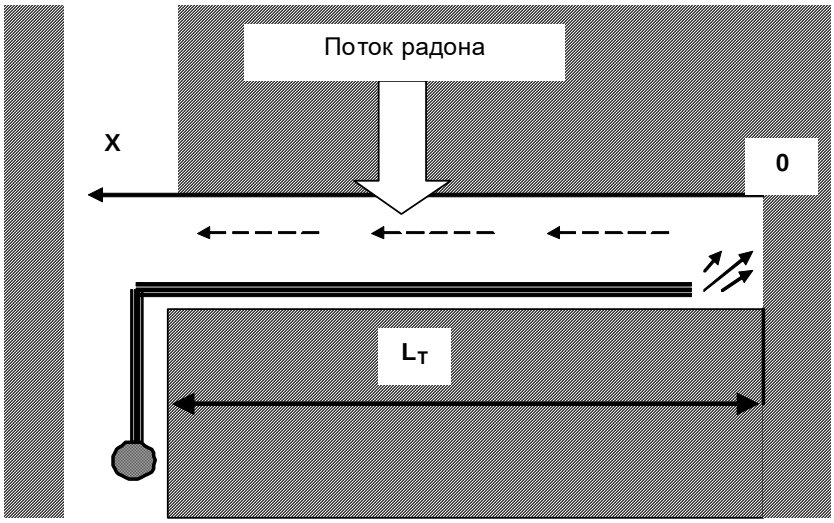


Рис. 2. Расчетная схема переноса радона в тоннеле

В общем виде нестационарная конвективно-турбулентная диффузия радона в тоннеле описывается одномерным уравнением параболического типа [9 – 11]:

$$\frac{\partial A_{Rn}}{\partial t} + u_T \frac{\partial A_{Rn}}{\partial x} = D_T \frac{\partial^2 A_{Rn}}{\partial x^2} - \lambda_{Rn} A_{Rn} + \left(\Sigma I_{Rn}\right)_{\text{Т}}, \qquad (16)$$

где A_{Rn} – удельная активность воздушно-радоновой смеси; u_T – средняя скорость воздуха в тоннеле; D_T – коэффициент турбулентной диффузии; $\left(\Sigma I_{Rn}\right)_{\text{Т}}$ – суммарные выделения радона в воздух тоннеля из различных источников.

Адаптируя уравнение (16) к реальным физическим условиям, перенос радона в строящемся тоннеле можно описать следующим уравнением:

$$\frac{d^2 A_{Rn}}{dx^2} - \frac{u_{ПВ}}{D_T}\frac{dA_{Rn}}{dx} - \frac{\lambda_{Rn}}{D_T} A_{Rn} + \left(\Sigma I_{Rn}\right)_{\text{ПВ}} D_T^{-1} = 0 \ . \qquad (17)$$

Граничные условия для строящегося тоннеля имеют следующий вид: $A_{Rn}(0) = 0$, $\lim\limits_{x\to\infty} A_{Rn} \neq \infty$.

Решение краевой задачи для уравнения (3.30) получено в следующем виде:

$$A_{Rn}(x)=\frac{(\Sigma I_{Rn})_{\mathrm{T}}}{\lambda_{Rn}}\left\{1-\exp\left[x\left(\frac{u_T}{2D_T}-\sqrt{\frac{u_T^2}{4D_T^2}+\frac{\lambda_{Rn}}{D_T}}\right)\right]\right\}. \qquad (18)$$

Разработана программа ARnPV для вычислительных экспериментов с использованием стандартного пакета MATHEMATICA 2.2.

Результаты вычислительных экспериментов представлены на рис. 3 в виде графиков зависимости безразмерной величины $\mathbf{A}_{Rn}=A_{Rn}(x)/A_{Rn\infty}$ от *x*, где $A_{Rn\infty}=(\Sigma I_{Rn})_T/\lambda_{Rn}$, $\mathbf{A}_{Rn}=\lambda_{Rn}A_{Rn}(x)/(\Sigma I_{Rn})_{\mathrm{T}}$.

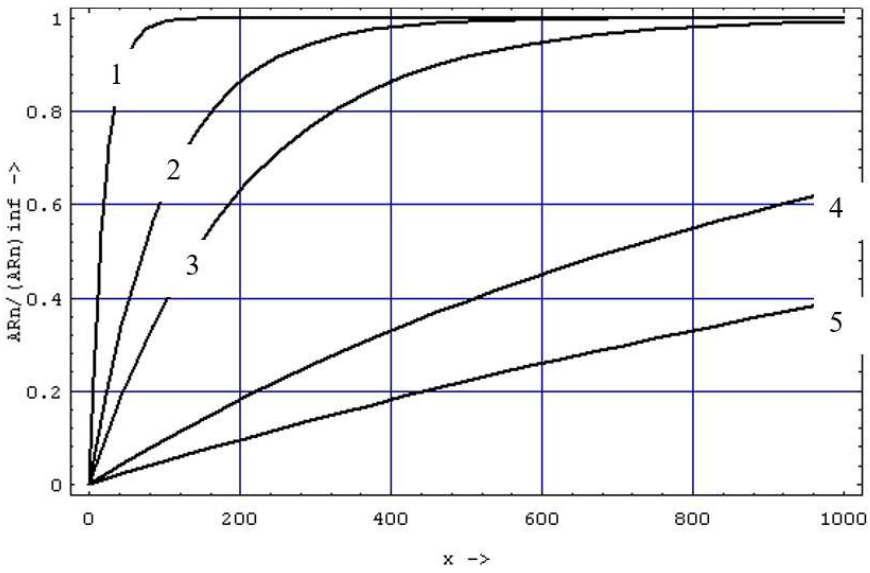


Рис. 3. Графики зависимости $\mathbf{A}_{Rn}$ от координаты x. Значения β, 1/м: 1 – $5\cdot10^{-2}$; 2 – 10^{-2}; 3 – $5\cdot10^{-3}$; 4 – 10^{-3}; 5 – $5\cdot10^{-4}$

Вычислительные эксперименты проведены для различных значений β, где $\beta=-u_T/2D_T+\sqrt{u_T^2/4D_T^2+\lambda_{Rn}/D_T}$. Анализ результатов вычислительных экспериментов показывает, что при достаточно больших значениях *x* величина $\mathbf{A}_{\mathrm{Rn}}$ стремиться к единице. Удельная активность воздуха в тоннеле зависит от величины абсолютного радоновыделения, скорости радиоактивного распада радона, средней скорости движения воздуха и коэффициента турбулентной диффузии. Следовательно, зависимость (18) может использоваться для динамического расчета количества воздуха в подготовительной выработке по фактору радоновыделения.

Алгоритм и комплекс программных средств для расчета количества воздуха по фактору выделения радона в строящиеся тоннели. Для автоматизации расчетов количества воздуха по фактору выделений радона разработаны программы на объектно-ориентированном языке Borland C++Builder 6.0, которые использовались вычислительных экспериментах.

1. Формируется информационный блок исходных данных, включающий следующие параметры:

Q_{Rn}^{T} - количество воздуха, которое необходимо подавать в подготовительный забой, чтобы концентрация радона на исходящей струе подготовительной выработки не превышала ПДК$_{Rn}$;

L_T – проектная длина тоннеля;

S_T – площадь поперечного сечения тоннеля в свету;

$k_{УТ}$ – коэффициент утечек воздуха в вентиляционном трубопроводе.

2. Рассчитывается количество воздуха по абсолютному выделению радона для забоев тоннелей (Q_{Rn}^{T}):

$$Q_{Rn}^{T} = \frac{D_T S_T}{L_T \sqrt{k_{УТ}}} \left(\ln \left| 1 - \frac{\lambda_{Rn} ПДК_{Rn}}{(\Sigma I_{Rn})_{\text{Т}}} \right| - \frac{\lambda_{Rn} L_T}{D_T \ln \left| 1 - \frac{\lambda_{Rn} ПДК_{Rn}}{(\Sigma I_{Rn})_{\text{Т}}} \right|} \right). \qquad (19)$$

Разработанные математические модели радоновыделения и расчета количества воздуха были положены в основу алгоритмов и комплекса программных средств, позволяющего автоматизировать процесс решения инженерных задач при использовании усовершенствованных методик прогноза газовыделений в тоннели и расчета количества воздуха необходимого для их проветривания.

Список литературы

1. Стась Г.В., Титов Д.Ю. Закономерности пространственного распределения радона в пределах Тульской области // Известия вузов. Горный журнал. 2005. Вып.1. С. 46-47.

2. Стась Г.В., Титов Д.Ю. Выделение радона из угольных пластов и вмещающих пород // Известия вузов. Горный журнал. 2005. Вып. 2. С. 19-20.

3. Стась Г.В., Титов Д.Ю. Выделение радона из шахтных подземных вод // Известия вузов. Горный журнал. 2005. Вып.2. С. 31-32.

4. Левкин Н.Д., Стась Г.В., Титов Д.Ю. Радон в поверхностных и подземных водах Тульской области // Известия Тульского государственного университета. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2006. Вып. 8. С. 8-12.

5. Левкин Н.Д., Стась Г.В., Титов Д.Ю. Уран – источник появления радона в породоугольном массиве // Известия Тульского государственного университета. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2006. Вып. 8. С. 12-14.

6. Качурин Н.М., Поздеев А.А., Стась Г.В. Прогноз выделения радона в горные выработки угольных шахт // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2012. Вып. 1. Ч. 2. С. 133-142.

7. Радон в атмосфере угольных шахт / Н.М. Качурин, А.А. Поздеев, Н.И. Абрамкин, Г.В. Стась // ГИАБ, 2012. Вып. 8. С. 88-94.

8. Стась Г.В. Аэрогазодинамические процессы выделения радона и его переноса вентиляционными потоками воздуха при подземной добыче угля // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2016. Вып. 2. С. 173-188.

9. Разбавление радона при проветривании подземных камер / Н.М. Качурин, Л.Э. Шейнкман, В.И. Сарычев, Г.В. Стась // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2012. Вып. 1. С. 103-107.

10. Качурин Н.М., Поздеев А.А., Стась Г.В. Выделения радона в атмосферу горных выработок угольных шахт // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2012. Вып. 1. С. 46-56.

11. Качурин Н.М., Поздеев А.А., Стась Г.В. Теоретическое обоснование прогноза выделения радона в атмосферу угольных шахт // Рудник будущего. 2012. №3(11). С. 113-119.

Стась Галина Викторовна, д-р техн. наук, доцент, galina_stas@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Голик Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, v.i.golik@mail.ru, Россия, Владикавказ, Северокавказский государственный технологический университет,

Ковалев Роман Анатольевич, д-р техн. наук, профессор, директор института, ecology_tsu_tula@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Апете Гоку Ландри, аспирант, galina_stas@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

EMISSION OF RADON IN THE ATMOSPHERE OF BUILDING TUNNELS

G.V. Stas, V.I. Golik, R.A. Kovalev, Apete Goku Landry

The source of radon in the rock mass is scattered uranium, so the source can be considered uniformly distributed in the rock mass. Since the half-life of uranium, depending on the type of isotope, can range from $2.48 \cdot 10^5$ to $4.51 \cdot 10^9$ years, the intensity of the source of radon emissions into the pores and cracks of the rock mass can be assumed constant. The developed algorithm and software package for calculating radon emissions in tunnels allow automating the design process of tunnel ventilation systems, where radon emissions are a significant gas factor.

Key words: radon, tunnel, diffusion, sorption, rock mass, specific activity, air.

Stas Galina Viktorovna, doctor of technical science, docent, galina_stas @mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Golik Vladimir Ivanovich, doctor of technical science, professor, v.i.golik@ mail.ru, Russia, Vladikavkaz, North Caucasus State Technological University,

Kovalev Roman Anatolievich, doctor of technical science, professor, director of an institute, ecology_tsu_tula@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Apete Goku Landry, postgraduate, galina_stas@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.632

ТИПЫ МОДЕЛЕЙ РАЗГРАНИЧЕНИЯ ДОСТУПА

В.А. Бопп

В работе рассматриваются модели разграничения доступа. В основе мандатной модели – метки конфиденциальности. Дискреционная модель предоставляет доступ с использованием матрицы доступа, однако не так проста в администрировании, как ролевая, которая позволяет быстро переназначать пользовательские роли и более гибко настраивать права доступа.

Ключевые слова: модели доступа, мандатная, ролевая, дискреционная, разграничение прав.

В настоящее время современный мир переживает технологическую революцию. Информация не только переносится в электронный вид, но и может иметь только цифровой вариант. Утрата важных данных всегда приводила к потерям: временным, финансовым и репутационным. Исключить такие потери полностью невозможно, однако реально снизить риск утраты данных и снизить последующие издержки.

В настоящее время существует множество различных способов обеспечения сохранности данных в информационных системах. Все они базируются на известных технологиях, одна из которых – обеспечение безопасности доступа к данным.

Под безопасностью доступа к данным следует понимать грамотное разграничение доступа к информации, где конечный пользователь имеет доступ только к тем данным, которые для него предназначены и может выполнять только те действия, которые ему разрешены. Такой подход осуществим с использованием политик безопасности с мандатным, ролевым и дискреционным доступом [1].

Мандатный способ управления доступом подразумевает использование метки конфиденциальности, хранящейся на объекте для определения возможности доступа субъекта к этой информации [2].

Когда пользователь обращается к файлу или информационному ресурсу, система запрашивает метку конфиденциальности у пользователя и принимает решение о предоставлении доступа.

Мандатная модель управления доступом может иметь вид иерархической (рис. 1) и неиерархической. При иерархической структуре пользователь с уровнем доступа выше, чем требует метка конфиденциальности, получает доступ к файлу или ресурсу.

В обратном случае, когда метка конфиденциальности объекта выше по значимости, чем метка пользователя, то пользователь получить доступ не может. При неиерархическом способе мандатного доступа определяется совпадение меток. Пользователь может получить доступ к информации только в случае равенства метки пользователя и метки файла или ресурса.

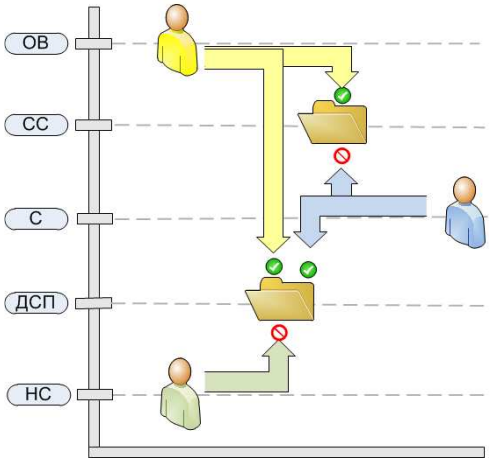


Рис. 1. Мандатная модель управления доступом

Пользователь с высшим уровнем доступа, чем требует метка конфиденциальности, в отличие от иерархической структуры, не получит доступ к запрашиваемому ресурсу. Такая модель применяется в системах с чёткой классификацией информации и высоким уровнем конфиденциальности.

В основе дискреционной модели лежит определяющая права доступа матрица (рис. 2), где строки – субъекты, а столбцы – объекты. В такой модели ресурсы системы принадлежат пользователям, доступ к ресурсам определяет его владелец. Дискреционная модель доступа позволяет определить какие операции разрешены с запрашиваемыми ресурсами. Для каждого из них определяются права доступа: право на просмотр, изменение, выполнение или удаление объекта [3].

Преимущество такого способа в простоте его реализации и его универсальности, поскольку дискреционная модель управления доступом поддерживается всеми операционными системами семейства Windows и Linux.

Один из главных недостатков заключается в том, что пользователь, имеющий право на чтение, может передать это право другим, не имеющим прав, пользователям без уведомления владельца. Нет уверенности, что информация не станет доступна пользователям, у которых нет к ней доступа.

Развитием дискреционной модели является ролевая модель доступа. Она заключается в предоставлении доступа к запрашиваемому объекту на основе роли пользователя, которая определяется на основе типов активностей в системе. Вместо предоставления доступа каждому пользователю к каждому объекту, доступ предоставляется группе пользователей, входящих в роль.

Предоставление доступа на уровне ролей позволяет настраивать систему таким образом, чтобы каждая роль со своими привилегиями наследовала привилегии других ролей, что позволяет гибко настраивать систему. В случае, когда у пользователя меняются обязанности, достаточно лишь удалить его связь со старыми ролями и назначить новые.

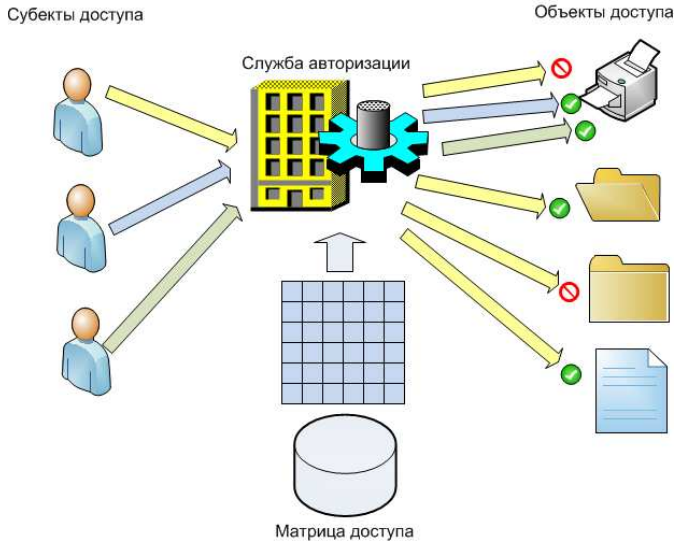


Рис. 2. Дискреционная модель управления доступом

Существуют операции, которые в целях безопасности и исключения мошенничества, не могут быть выполнены одним пользователем. Такой операцией может быть подготовка, подтверждение и выполнение платежа. Один пользователь подготавливает платёж, второй его подтверждает, третий – выполняет. Система ролевого управления позволяет обеспечить подобное разделение обязанностей. Кроме того, пользователю с большим количеством привилегий не всегда требуется использовать их все. В таком случае регистрация может происходить только с теми привилегиями, которые требуются для выполнения задачи.

Таким образом, модели доступа различаются между собой технологически, однако все они позволяют уменьшить вероятность несанкционированного взаимодействия с информацией, в том числе модификации и её безвозвратного удаления. Мандатная модель управления доступом позволяет получать доступ по меткам конфиденциальности, однако пользователь может получить доступ к любой менее конфиденциальной информации. Дискреционная модель позволяет более гибко распределять права доступа, но при таком способе невозможно в целях обеспечения наивысшей безопасности разделить операцию на нескольких пользователей. Это позволяет реализовать ролевая модель. Она проста в администрировании и позволяет быстро перераспределять роли в случае появления у пользователя необходимости в доступе к недоступным ранее ресурсам. Грамотная система распределения доступа и управления файловыми ресурсами позволяет значительно снизить вероятность неправомерного ознакомления, модификации и удаления информации из системы.

Список литературы

1. Обзор и сравнение существующих методов управления доступом // Институт вычислительных технологий СО РАН [Электронный ресурс]. URL: http://www.ict.nsc.ru/ws/YM2003/6312/ (дата обращения: 05.10.2019).

2. Мандатное управление доступом // Википедия - свободная энциклопедия. [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ Мандатное_управление_доступом (дата обращения: 05.10.2019).

3. Избирательное управление доступом // Википедия - свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ Избирательное_управление_доступом (дата обращения: 05.10.2019).

Бопп Виктория Андреевна, магистрант, miss.blackbery@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

TYPES OF ACCESS CONTROL MODELS

V.A. Bopp

The paper considers models of access control. The mandate model is based on privacy labels. The discretionary model provides access using the access matrix, but is not as easy to administer as the role model, which allows you to quickly reassign user roles and configure access rights more flexibly.

Key words: access models, mandate, role, discretionary, differentiation of rights.

Bopp Victoria Andreevna, master, miss.blackbery@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 681.518.2

РАННЕЕ ОБНАРУЖЕНИЕ НАЧАЛА ПОСТЕПЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

В.И. Павлов, С.В. Артемова, А.Н. Грибков, О.А. Белоусов, М.П. Беляев, И.В. Нагорнова

Разработана процедура раннего обнаружения начала постепенного изменения свойств случайных процессов (разладки). В разработанной в байесовской постановке процедуре предложено для раннего обнаружения постепенной разладки помимо исходных данных, в которых ищется разладка, использовать дополнительную информацию от индикаторов, косвенно свидетельствующих о возможной разладке. Предложены два варианта процедуры. Результаты моделирования показали, что величина задержки в обнаружении разладки в среднем сокращается на 20% по сравнению с существующими процедурами. Разработанная процедура предназначена для реализации в информационно-измерительных системах, применяемых в различных предметных областях

Ключевые слова: случайный процесс, изменение, сопутствующий признак, обнаружение.

Процессы, протекающие в различных природных средах, материалах, элементах технических систем и пр. и подверженные воздействию разнообразных как внешних, так и внутренних факторов, являются случайными. При регистрации подобных процессов посредством информационно-измерительных систем (ИИС) на выходе ИИС получают случайную последовательность данных. Задача обнаружения изменения свойств случайных последовательностей, или задача обнаружения разладки, встречается во многих областях, например, при радиолокации воздушных объектов [1], контроле теплофизических свойств теплоизоляционных покрытий [2] и др. Возможны два варианта изменения свойств случайных последовательностей - скачкообразное и постепенное. Скачкообразная разладка характерна при смене режимов функционирования систем, при внезапных отказах и т. п. В работах [3, 4] рассматривалась задачаобнаружения скачкообразной разладки в предположении, что она рано или поздно произойдет. В то же время, например, при воздействии имитирующих помех на локационные системы,

в химических процессах в присутствии катализаторов разладка происходит постепенно. Очевидно, что обнаружить случайный момент наступления разладки необходимо за минимально возможный промежуток времени.

Этому требованию в наибольшей степени удовлетворяют алгоритмы, построенные в соответствии с методами последовательного обнаружения разладки. В подавляющем большинстве работ [3-6] при обнаружении разладки используется только последовательность наблюдаемых данных без привлечения дополнительной информации. В то же время разладка наблюдаемой последовательности связана с изменением каких-либо параметров элементов, участвующих в генерировании данных. Например, изменение скорости химической реакции может быть вызвано изменением массы катализатора, изменение траектории летательного аппарата связано с его переориентацией относительно центра массы, что вызывает изменение мощности отраженного радиолокационного сигнала из-за изменения эквивалентной площади рассеивания и т.п.

Во многих практических случаях наряду со слежением за информативной составляющей последовательности, разладка которой интересует исследователя, имеется возможность регистрироватьизменения сопутствующего признака (мощности отраженного сигнала, массы катализатора), стохастически связанного с возможной разладкой наблюдаемой последовательности данных. Подобные регистрирующие устройства целесообразно назвать индикаторами сопутствующего признака. В настоящей работе решается задача последовательного обнаружения начала постепенной разладки по информации измерителя и одного индикатора сопутствующего признака.

Основные характеристики последовательных методов обнаружения разладки случайных последовательностей – это среднее время между соседними ложными тревогами и среднее время запаздывания при обнаружении разладки. Многими авторами был решен ряд содержательных задач с постановками раннего обнаружения разладки, отражающими те или иные практически актуальные вопросы функционирования систем и протекающих в них процессов. В последние годы наблюдается повышенный интерес к разработке методов скорейшего обнаружения изменения свойств случайных процессов [7].

Определенные общие недостатки свойственны многим последовательным методам обнаружения разладки. Так, из-за плавного изменения вероятностных характеристик наблюдений вследствие дефектов измерителей, многие методы не способны своевременно обнаруживать постепенное изменение свойств процессов. При реализации байесовских методовнеобходимо задание априорной информации о распределении моментов возникновения разладки, при этом точность априорной информации существенно влияет на величину задержки в обнаружении, часто неприемлемо большую для практики. Наличие данных недостатков, необходимость снижения их влияния на характеристики последовательных методов обнаружения

постепенной разладки случайных процессов обуславливают актуальность модернизации существующих и разработки новых методов решения разнообразных практических задач.

Постановка задачи. Предположим, что с помощью многошагового процесса наблюдается выходной сигнал измерителя Z_k, а общая модель процесса измерения в ИИС имеет вид [2]:

$$Z_k = \varphi_j(x_k, Q) + W\zeta_{jk}, \quad j=0,1; \; k=\overline{1,K}, \tag{1}$$

где x_n – последовательность исходных данных, содержащая неинформативный признак разладки Q; φj - известные однородные функции, которые отличаются друг от друга величиной одного из параметров (для линейных функций - угловым коэффициентом; для гармонических функций - либо амплитудой, либо частотой, либо фазой и т.п.), j=0 соответствует исходным данным при отсутствии, а j=1 – при наличии разладки; ζ_{jk} - белые дискретные центрированные гауссовские шумы единичной интенсивности; W - интенсивность шума измерителя; k – номер текущего измерения; K – количество измерений в серии. Процесс измерения является многошаговым, причем количество измерений K и промежутки времени между измерениями могут целенаправленно изменяться в зависимости от предполагаемой динамики исследуемого процесса и стоимости измерений.

Для измерителей из состава ИИС на основании практики эксплуатации устанавливаются пороговые значения выходных сигналов, за пределами которых возможно начало постепенной разладки исследуемой последовательности. При выходе сигнала какого-либо измерителя за установленный порог такой измеритель в процедуре обнаружения рассматривается в качестве индикатора сопутствующего признака и модель его функционирования (1) заменяется на

$$Y_k = \Psi_{s,k}(Q), \tag{2}$$

где Y_k – выходной сигнал индикатора, связанный с сопутствующим началу изменения признаком Q посредством оператора $\Psi_{s,k}$. Выходному сигналу индикатора соответствуют следующие значения величины s: $s=0$ соответствует отсутствию сопутствующего признака Q и $s=1$ – наличию признака Q при наблюдении исходных данных x_k. Оператор $\Psi_{s,k}$ задается условной вероятностью перехода

$$\Psi_{s,k} = \Psi(s_k, k \mid s_{k-1}, Y_{k-1}, Q, k-1), \quad s=0,1; \; k=\overline{1,K} \tag{3}$$

из состояния s_{k-1}в состояние s_k. Описание функционирования индикаторов (2) и (3) является универсальным и не зависит от физической сущности измеряемой величины.

При измерении Z_k в соответствии с (1) могут иметь место две гипотезы: $\Theta=0$ и $\Theta=1$. Гипотеза $\Theta=0$ соответствует отсутствию разладки, а $\Theta=1$ означает наличие разладки, начало которой происходит из-за воздействия одного или совокупности негативных факторов в случайный момент времени n, $1<n<N$ с вероятностью близкой к единице. Разладка происходит

постепенно, что может быть охарактеризовано изменением вероятностных характеристик последовательности исходных данных, например, закона изменения математического ожидания.

По результатам анализа исследуемого процесса определяется априорная вероятность $P_{k-1}(\Theta=1)=P_{1,1}$, а также плотности распределений вероятностей измерений $p_0(Z_k)=p(Z_k|\Theta=0)$, $p_1(Z_k|n)=p(Z_k|\Theta=1)$ в случае отсутствия и при наличии изменений свойств в момент n. Требуется по результатам обработки выходных сигналов (1) и (2) последовательным образом принять решение о наличии или отсутствии начала изменения свойств последовательности x_k .

Теория. Информация от индикатора может использоваться по двум направлениям: первое (вариант 1) - для управления величиной порога, с которым сравнивается апостериорная вероятность разладки, вычисляемая на основании выходного сигнала измерителя; второе (вариант 2) - для вычисления апостериорных вероятностей гипотез о наличии или отсутствии разладки на основании выходных сигналов измерителя и индикатора.

Вариант 1. Будем считать потери при принятии решения $u_n=j$ об отсутствии $(j=0)$ или наличии $(j=1)$ разладки на k-м шаге, имеющими вид

$$g(\Theta,u_k,n,k)=\begin{cases} g_{0j}(k) & при\ \ \Theta=0,\ \ k<K,\\ g_{1j}(k)+C(k-n) & при\ \ \Theta=0,\ \ k<K,\\ \tilde{g}_{0j}(k) & при\ \ \Theta=0,\ \ k=K,\\ \tilde{g}_{1j}(k) & при\ \ \Theta=1,\ \ k=K, \end{cases} \tag{4}$$

где $g_{00}(k)$ – потери, связанные с правильным необнаружением изменений. Данные потери обуславливаются стоимостью измерений; $g_{01}(k)$ – потери, вызванные ложной тревогой. Данные потери связаны, как правило, с необходимостью дополнительных проверок оборудования; $g_{11}(k)$ – потери, связанные с правильным обнаружением начала изменения контролируемой последовательности. Несмотря на обнаружение разладки данные потери являются минимальными; С – потери, вызванные задержкой в обнаружении на один шаг; $g_{10}(k)$ – потери, возникающие из-за необнаружения разладки. Данные потери приводят к значительным затратам не только на восстановление контролируемых свойств случайных процессов, но и обусловлены возможными дефектами в объектах и, как правило, являются наибольшими; $g_{0j}(K)$ и $g_{1j}(K)$ – потери, обусловленные решением, принимаемым по завершении текущей серии измерений, аналогичные по содержанию $g_{0j}(k)$ и $g_{1j}(k)$.При постепенном изменении свойств случайных последовательностей, как правило, справедливы следующие соотношения

$$\begin{gathered} g_{00}(k)<<g_{01}(k)<g_{10}(k);\\ g_{11}(k)+C(k-n)<<g_{01}(k)<g_{10}(k);\\ \tilde{g}_{11}(K)<<\tilde{g}_{10}(K)<\tilde{g}_{01}(K);\\ \tilde{g}_{0j}(K)<g_{oj}(k);\ \ g_{1j}(k)<\tilde{g}_{1j}(K). \end{gathered} \tag{5}$$

В разрабатываемой процедуре байесовское последовательное правило обнаружения начала изменения последовательности Z_k, $k=\overline{1,K}$, которое минимизирует средний риск $r_k(n)=M\left[g(\Theta,u_k,n,k)\right]$, находится на основе минимизации апостериорного риска $r_k(Z_k,u_{k-1})=r_k(Z_k)$ выбором $j\in\overline{0,1}$ [8]. В правиле обнаружения учитывается то, что апостериорный риск не зависит от $u_1, ..., u_{k-1}$,так как эти решения связаны с продолжением измерений из-за необнаружения изменений в них в данной серии. Тогда выражение для апостериорного риска будет иметь вид

$$r_k(Z_k)=\min\left\{\begin{array}{l}\inf\limits_{u_k\in U_з} M\left[g(\Theta,u_k,n,k)\mid Z_k,u_k\right],\\ \inf\limits_{u_k\in U_{пр}} M\left[r_k(Z_{k+1},u_k\mid Z_k,u_k\right]\end{array}\right\}, \qquad (6)$$

где $U_з$ и $U_{пр}$ – области решений, определяющие завершение и продолжение измеренийсоответственно.

Применяя формулу полного математического ожидания, а также функцию (4), учитывающую потери от принимаемых решений, как на протяжении, так и по окончании текущей серии измерений, и соотношения (5) можно определить, что

$$M\left[g(\Theta,u_k,n,k)\mid Z_k,u_k\right]=\left\{\begin{array}{ll}g_{10}(k)P_{1,k}+g_{00}(k) & при\ \ u_k=0,\\ g_{01}(k)(1-P_{1,k})+g_{00}(k) & при\ \ u_k=1,\end{array}\right. \qquad (7)$$

где $P_{1,k}=P(\Theta=1\mid Z_k$ – апостериорная вероятность начала постепенного изменения последовательности исходных данных. Получаемое решение $\delta_k(Z_k)=u_k\in U_ç$, при котором потери (7) принимают наименьшее значение

$$\inf_{u_k\in U_з} M\left[g(\Theta,u_k,n,k)\mid Z_k,u_k\right]=q(P_{1,k})+g_{00}(k), \qquad (8)$$

$$q(P_{1,k})=\min\left\{g_{10}(k)P_{1,k};\ g_{01}(k)(1-P_{1,k})\right\} \qquad (9)$$

имеет вид

$$\delta_k(Z_k)=\left\{\begin{array}{ll}j=0 & при\ \ g_{10}(k)P_{1,k}<g_{01}(k)(1-P_{1,k}),\\ j=0 & при\ \ g_{10}(k)P_{1,k}>g_{01}(k)(1-P_{1,k}).\end{array}\right. \qquad (10)$$

Для второй минимизируемой компоненты в (6), связанной с продолжением измерений по аналогии с (6)-(9) будут справедливы следующие зависимости

$$\rho_K(Z_k)=M\left[r_k(Z_{k+1},u_k\mid Z_k,u_k)\right]=$$
$$=\min\left\{q(P_{1,k})+\tilde{g}_{00}(K),\ M\left[r_K(Z_{k+1},u_k\mid Z_k,u_k)\right]\right\},\ \ k=K-1,...,1,$$
$$q(P_{1,k})=\min\left\{\tilde{g}_{10}(K)P_{1,K};\ \tilde{g}_{01}(K)(1-P_{1,K})\right\},$$
$$M\left[r_K(Z_{K+1},u_k\mid Z_k,u_k)\right]=\left\{\begin{array}{ll}\tilde{g}_{10}(K)P_{1,k}+\tilde{g}_{00}(K) & при\ \ u_K=0,\\ \tilde{g}_{01}(K)(1-P_{1,k})+\tilde{g}_{00}(K) & при\ \ u_K=1.\end{array}\right.$$

По смыслу $\rho_K(Z_k)$ является наименьшим будущим апостериорным риском. Момент прекращения измерений определяется как

$$\tau_з = \inf\{k\Delta t : q(P_{1,k}) = \rho_K(Z_K)\}. \quad (11)$$

Оптимальное правило обнаружения постепенногонегативного изменения исходных данных может быть представлено в виде [8]

$$\delta^* = \begin{cases} u_k \quad при\ k\Delta t < \tau_з; \\ j = 0 \quad при\ k\Delta t = \tau_з,\ P_{1,k} < c_з; \\ j = 1 \quad при\ k\Delta t = \tau_з,\ P_{1,k} > c_з, \end{cases} \quad (12)$$

где значение порога $c_з$ в момент прекращения измерений определяется как

$$c_з = g_{10}(k)/[g_{10}(k) + g_{01}(k)]. \quad (13)$$

При регистрации индикатором признака возможного негативного изменения в исходных данных независимо от принятого в (12) решения после момента (11) начинается новая серия измерений.

Апостериорная вероятность $P_{1,k}$ начала постепенного изменения последовательности исходных данных Z_k на k-м шаге вычисляется по формуле Байеса

$$P_{1,k} = [P_{1,k-1}\Lambda_k]/[P_{1,k-1}\Lambda_k + (1 - P_{1,k-1})],\ k = \overline{1,K},\ P_1(k=1) = P_{1,1}, \quad (14)$$

где $\Lambda_k = p_{1,k}(Z_k \mid Z_{k-1}) / p_{0,k}(Z_k \mid Z_{k-1})$.

Процесс фиксации достижения порогового значения индикатором в (2) несоизмеримо короче по времени по сравнению с процессами, приводящими к постепенной разладке. В таком случае индикатор можно считать безынерционным. Тогда, в момент n соответствующего изменения сигнала на выходе индикатора также можно считать, что изменения контролируемых свойств случайных процессов будут происходить с вероятностью $P(\Theta=1)=1$. Это означает, что апостериорную вероятность (14) целесообразно сравнивать со значением порога, учитывающим потери от решений в конечный момент предварительно определенной по длительности серии измерений

$$c_з = \tilde{g}_{10}(K)/[\tilde{g}_{10}(K) + \tilde{g}_{01}(K)], \quad (15)$$

при этом правило обнаружения начала негативного изменения будет иметь вид

$$\delta_n^* = \begin{cases} j = 0 \quad при\ P_{1,k} < c_{зп}; \\ j = 1 \quad при\ P_{1,k} > c_{зп}. \end{cases} \quad (16)$$

После момента, совпадающего с фиксацией индикатором признака возможного начала разладки, измерения в текущей серии должны быть продолжены до момента $\tau_з$, определяемого в соответствии с (11), в случае, если до этого не обнаружены изменения по правилу (16). При сравнении значений порогов (13) и (15) и учетеназначенных соотношений (5) видно, что при использовании информации от условно безынерционного индикатора сопутствующего признака возможно существенное сокращение задержки в определении разладки за счет снижения уровня порога.

Вариант 2. Пусть потери, имеющие место при принятии решения $u_k=j$, $j \in 0,1$ аналогичны (4), а из-за наличия имитирующих исходную последовательность сигналов справедливы соотношения (5), в которых

$$g_{10}(k)=g_{01}(k);\ \ g_{10}(K)=g_{01}(K).$$

Тогда в случае одноальтернативной ситуации выбора одной из двух гипотез при пороге сравнения $c_з = 0.5$ апостериорная вероятность разладки может быть вычислена на основании выходного сигнала измерителя и стохастически связанного с признаком разладки Q выходного сигнала индикатора (2). Формула (14) примет вид

$$P_{1,k} = \left[P_{1,k-1}\Lambda_k \Psi_{s,k}\right] / \left[P_{1,k-1}\Lambda_k \Psi_{s,k} + (1-P_{1,k-1})\right], \qquad (17)$$

где $\Lambda_k = p_{1,k}(Z_k \mid Z_{k-1}) / p_{0,k}(Z_k \mid Z_{k-1})$, а решение о наличии разладки в текущей серии принимается при $P_{1,k} > 0.5$, после чего происходит переход к новой серии наблюдений.

Исследование разработанной процедуры обнаружения. Исследование разработанной процедуры обнаружения начала постепенного изменения свойств случайных последовательностей проводилось путем компьютерного моделирования.

В качестве измеряемой была принята модель (1), в которой $\varphi_0(x_k, Q) = l_0 k$, $\varphi_1(x_k, Q) = l_1 k$ – линейные отрезки с угловыми коэффициентами l_0 и l_1. Разладка моделировалась путем взаимных замен l_0 и l_1 в случайные моменты времени. Выходной сигнал индикатора моделировался марковской цепью на два состояния s_k=0 и s_k=1, соответствующие отсутствию и наличию признака Q в последовательности x_k. Считалось, что в момент начала изменения и вплоть до принятия решения признак Q присутствует в x_k с вероятностью 1. Марковская цепь x_k при моделировании функционирования индикатора задавалась условными вероятностями переходов [8]

$$\Psi(s_k, k \mid s_{k-1}, Y_{k-1}, Q, k-1) = \begin{cases} \Psi(s_k \mid Y_k (1-e^{-\Delta t/T}) & s \neq s_{k-1}, \\ \Psi(s_k \mid Y_k (1-e^{-\Delta t/T}) + e^{-\Delta t/T} & s = s_{k-1}, \end{cases}$$

где $\Psi(s_k, k \mid Y_k)$ – характеристика индикатора: $\Psi(0 \mid 0)$ – вероятность правильного необнаружения; $\Psi(0 \mid 1)$ – вероятность ложной тревоги; $\Psi(1 \mid 0)$ – вероятность пропуска; $\Psi(1 \mid 1)$ – вероятность правильного обнаружения признака. Статистика Λ_k в (14) задавалась в виде

$$\Lambda_k = k\Delta t / W \left[l_k \sum_1^k (Z_k - l_{0k}) - 0{,}5 l_k^2 \right],\ \ l_k = l_{1k} - l_{0k},\ \ k = \overline{1, K}.$$

Величина порога, в соответствии с процедурой (7)-(14) в случае малых стоимостей наблюдений $g_{00}(k)$ и интенсивности шума W^2, т.е. когда $W^2 g_{00}(k)/l_k^2 << 1$, определялась по формуле

$$c_з = 1 - 2W^2 g_{00}(k) / \left| l_k^2 - g_{10}(k) \right|,$$

а при срабатывании индикатора в k-й момент времени – по формуле

$$c_{зk} = 1 - 2W^2 g_{00}(k) / \left| l_k^2 - \tilde{g}_{10}(K) \right|.$$

Результаты моделирования, обработанные по методу Монте-Карло, показали, что величина задержки в обнаружении начала постепенного изменения свойств случайных последовательностей при различных числовых соотношениях в (5) для двух вариантов разработанной процедуры в среднем сокращается на 20% по сравнению с существующими процедурами.

Заключение. Разработана в байесовской постановке процедура обнаружения начала постепенного изменения исходных данных, особенностью которой является использование дополнительной информации от индикатора сопутствующего признака, что позволяет сократить задержку в обнаружении. Предложены два варианта сокращения задержки в обнаружении: за счет понижения величины порога сравнения апостериорной вероятности начала изменения в момент фиксации индикатором возможного наличия признака изменения в исходных данных; за счет вычисления апостериорной вероятности разладки на основании выходного сигнала измерителя контролируемого свойства и выходного сигнала индикатора сопутствующего признака. Величина задержки в обнаружении, а также количество ложных тревог, существенно зависят от назначаемых потерь при принятии решений. Также величина задержки в обнаружении зависит от характеристики индикатора. Следует отметить то, что негативное изменениеисходных данных может произойти и при не зарегистрированном признаке, в то время как фиксация возможного наличия признака не обязательно приводит к последующему изменению в исходных данных наблюдаемой последовательности. В тех случаях, когда анализируются длительные процессы, целесообразно предварительно назначать длительность серий измерений. Достоверность обнаружения начала изменения возрастает при совместном использовании нескольких индикаторов, которые не обязательно одновременно фиксируют соответствующий признак изменения. При использовании каждого конкретного индикатора, в силу его «коррелированности» с исследуемым процессом, функция потерь (5), влияющая на порог (15) будет индивидуальной. В ИИС очередную процедуру обнаружения разладки целесообразно начинать каждый раз по мере срабатывания какого-либо индикатора, при этом по результатам предшествующих тестов корректировать априорную информацию, в частности функцию потерь (5).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №20-08-00091.

Список литературы

1. Павлов В.И. Особенности полупассивного способа самонаведения средств поражения на объекты, выполненные по технологии «Stealth» // Известия РАРАН. 2017. №1(96). С.119 – 123.

2. Селиванова З.М., Павлов В.И. Интеллектуальная информационно-измерительная теплофизических свойств теплоизоляционных покрытий магистральных трубопроводов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 10. С.145 – 154.

3. Клигене Н., Телькснис Л. Методы обнаружения моментов изменения свойств случайных процессов (обзор) // Автоматика и телемеханика. 1983. № 10. С. 5 – 56.

4. Мальцев А.А., Силаев А.М. Обнаружение скачкообразных изменений параметров и оптимальное оценивание состояния дискретных динамических систем // Автоматика и телемеханика. 1985. № 1. С. 48 – 58.

5. Сосулин Ю.Г., Фишман М.М. Теория последовательных решений и ее применения. М.: Радио и связь, 1985. 272 с.

6. Филаретов Г.Ф., Червова А.А. Последовательный алгоритм обнаружения момента изменения дисперсии временного ряда // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019.Т 85. № 3. С. 75 – 82.

7. Тартаковский А.Г. Оптимальное обнаружение изменений свойств случайных последовательностей. II. Последовательное обнаружение // Автоматика и телемеханика. 1987. № 7. С. 106 – 113.

8. Бухалев В. А. Рекуррентные алгоритмы распознавания и оценивания состояния динамического объекта по информации от измерителей и индикаторов // Изв. РАРАН. Техническая кибернетика. 1992. № 1. С. 148 – 156.

Павлов Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, vpavl@mail.ru, Россия, Тамбов, Тамбовский государственный технический университет,

Артемова Светлана Валерьевна, д-р техн. наук, профессор, SArtemova@yandex.ru, Россия, Москва, МИРЭА-Российского технологического университета,

Грибков Алексей Николаевич, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, gribkovalexey@ya.ru, Россия, Тамбов, Тамбовский государственный технический университет,

Белоусов Олег Андреевич, канд. техн. наук, доцент, jiour314@gmail.com, Россия, Тамбов, Тамбовский государственный технический университет,

Беляев Максим Павлович, канд. техн. наук, начальник научно-исследовательского отдела, belyaev_mp@mail.ru, Россия, Воронеж, Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,

Нагорнова Ирина Викторовна, канд. техн. наук, заведующий кафедрой, irine.nagornova@yandex.ru, Россия, Москва, Московский политехнический университет

EARLY DETECTION OF STEPWISE VARIATION INITIATION POINT OF RANDOM PROCESSES PROPERTIES

V.I. Pavlov, S.V. Artemova, A.N. Gribkov, O.A. Belousov, M.P. Belyaev, I.V. Nagornova

A procedure has been developed for early detection of the beginning of a gradual change in the properties of random processes (debugging). In the procedure developed in the Bayesian statement, it is proposed to use additional information from indicators indirectly indicating a possible disorder, in addition to the initial data in which the adjustment is sought, for the early detection of gradual discrepancy. Two options for the procedure are proposed. The simulation results showed that the delay in detecting a discrepancy is reduced by an average of 20% compared to existing procedures. The developed procedure is intended for implementation in information-measuring systems used in various subject areas.

Key words: random process, change, accompanying sign, detection.

Pavlov Vladimir Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, vpavl@mail.ru, Russia, Tambov, Tambov State Technical University,

Artemova Svetlana Valerievna, doctor of technical sciences, professor, SArtemova@yandex.ru, professor, Russia, Moscow, MIREA - Russian Technological University,

Gribkov Aleksey Nikolaevich, doctor of technical sciences, head of the department, gribkovalexey@ya.ru, Russia, Tambov, Tambov State Technical University,

Belousov Oleg Andreevich, candidate of technical sciences, docent, jiour314@gmail.com, Russia, Tambov, Tambov State Technical University,

Belyaev Maksim Pavlovich, candidate of technical science, head of research department, belyaev_mp@mail.ru, Russia, Voronezh, Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarina,

Nagornova Irina Viktorovna, candidate of technical science, head of the department, irine.nagornova@yandex.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University

УДК 681.518.2

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ, СВЯЗАННЫХ С ПРОИЗВОДСТВОМ ЗЕМЛЯНЫХ РАБОТ, ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЗДАНИЯ МЕТОДОМ «UP-DOWN»

Т.Х. Бидов, В.С. Коновалов, К.С. Байсякина

В данной статье проведен обзор способа возведения зданий методом «Up-Down». Представлен ряд технических процессов, связанных с поэтапным производством земляных работ при данном методе. Предложена научно-техническая гипотеза, состоящая в предположении о возможности повышения эффективности возведения подземной части здания по методу «Up-Down». Выявлены факторы, оказывающие влияние на принятие организационно-технических решений при строительстве. Сформирована научная база для формирования инструмента по комплексной оценке организационно-технологических решений при производстве подземной части здания по методу «Up-Down».

Ключевые слова: метод строительства «Up-Down», оптимизация строительных процессов, организационно-технологический потенциал.

На сегодняшний день, плотная застройка городов и дефицит свободного пространства вынуждает все больше осваивать подземное строительство. В крупных городах России объем подземной застройки возрастает с каждым годом, так как это наиболее эффективный способ устройства территорий. Одной из таких технологий является метод «Up-Down» (полузакрытый способ работ).

Зачастую задачи, связанные с возведением высотных сооружений, требуют рационального использования подземного пространства [18, 19]. По современным требованиям большинство офисных и жилых зданий должны иметь подземные парковки. В некоторых случаях, расположение отметки пола нижнего яруса может достигать глубины до -36 м от уровня «чистого пола».

Метод «сверху-вниз» заключается в том, что первоначально в грунте устраивают выемки и траншеи, в которых по технологии «стена в грунте» возводят стены подземного сооружения. При отрывке траншей применяют землеройные машины циклического действия — грейферы, фрезерные установки и т.д., они изымают грунт на поверхность и переносят за территорию строительной площадки. Так как в условиях плотной застройки вблизи возводимого сооружения расположены фундаменты уже существующих зданий, данные работы выполняются захватками.

Следующим этапом возведения подземного сооружения этим методом является поуровневая разработка грунта по всей ширине здания и бетонирование перекрытий распорками, которые в свою очередь обеспечивают дополнительную жесткость сооружения. При многоярусной застройке грунт под перекрытиями разрабатывается с помощью малогабаритных экскаваторов на гусеничном ходу, обычных бульдозеров или малогабаритных погрузчиков. На поверхность разработанный грунт извлекается посредством грейферного экскаватора, через заранее оставленные отверстия в перекрытии либо с помощью автосамосвалов [5].

Существуют три основных техники разработки грунта слоями и устройства железобетонных перекрытий.

1. Первый технологический прием заключается в первоочередном возведении перекрытий безопалубочным методом, после которого следует поярусная разработка грунта [2]. Этот способ имеет повышенную трудоемкость работ.

2. Второй метод включает в себя сначала поярусную разработку грунта, а затем последующее бетонирование перекрытий с помощью опалубки, опирающейся на разработанное основание [3]. Этот метод менее трудоемок, но при этом возникают большие горизонтальные усилия в ограждении.

3. Третий прием сочетает в себе как элементы технологии возведения первым способом (безопалубочным), так и с опиранием опалубки на разработанное грунтовое основание [4]. Комбинирование этих методов (на основании технико-экономического сравнения): верхние перекрытия устраивают по второму методу (с опережающей разработкой грунта), а нижние по первому (с опережающим возведением перекрытий) также широко применяется.

Буровые колонны и траншейные стены выполняют функции опорных элементов будущих конструкций верхнего строения. Башенный кран устанавливается стационарно в специально усиленной зоне на перекрытие

в уровне земли при достижении 75% прочности бетона самого перекрытия. При достижении 100% прочности бетона перекрытия начинается возведение последующих подземных этажей [6].

На выбор наиболее эффективного комплекта машин для осуществления данных работ влияют многочисленные факторы: уровень сложности земляных работ, рельеф местности, дальность перевозки грунта, эффективность рабочего органа, а также геологические, гидрологические и климатические условия. По многофакторному анализу сегодня проведено большое количество исследований [20-29]. Но при возведении подземных сооружений методом «Up-Down» в условиях плотной застройки, сегодня, нет четкой системной модели, которая могла бы рассмотреть целый ряд факторов и предложить наиболее оптимальный вариант комбинаций данных параметров. Например, известно, что большой проблемой в данных условиях является невозможность размещения крупногабаритной техники на строительной площадке, поэтому при использовании метода «Up-Down» используются непосредственно малогабаритные строительные машины [1].

Однако, не только ограниченность площадей, выделенных для участка застройки, осложняет ситуацию возведения сооружений. Местная специфика и гидрогеологические условия зачастую делают задачу возведения подземных объектов очень непростой. Исходя из гидрогеологических условий подземного строительства крупных городов России, можно сделать вывод, что примерно в 20% случаев подземные сооружения возводятся на неустойчивых грунтах, имеющих низкие показатели коэффициента фильтрации. Такие условия в городе Москва составляют приблизительно 24% общего объема строительства под землей. В этих условиях необходимо использовать специальные способы производства работ [3].

При оценке рассматриваемого метода следует отметить, что при правильном использовании технологии его реализации в условиях плотной городской застройки, он вполне отвечает требованиям безопасности строительства. Метод позволяет строить подземные объекты вблизи сооружений, зданий и подземных коммуникаций. Анализируя метод строительства «Up-Down» в России, можно сделать вывод, что при несоблюдении технического регламента возведенные объекты будут иметь серьезные дефекты. Наиболее распространенной причиной сложившейся ситуации является отсутствие в некоторых случаях современных технических средств контроля за вертикальностью в процессе выемки грунта из траншей, не учет реальных гидрогеологических условий в процессе строительства, низкая квалификация и исполнительская дисциплина.

Также важно учесть технологические процессы для производства грунта:

1. Для строительства протяженных сооружений, находящихся под землей, таких как железнодорожные и пешеходные тоннели, грунт разрабатывают с одной стороны портальных участков, имеющих один общий проем [4]. При этом используют следующую технику:

- породопогрузочные машины;

- малогабаритные экскаваторы;
- бульдозеры.

Разработанный грунт транспортируют конвейерным транспортом, в вагонетках или автосамосвалах [7].

2. Для многоэтажных подземных сооружений (подземные стоянки и т.п.) разработка грунта ведется слоями сверху вниз. Грунт извлекают на поверхность автосамосвалами либо бадьями через отверстия в перекрытии с использованием автокрана [8]. Сами межярусные конструкции возводят:

На рис. 1 снизу вверх (рис. 1) — после возведения несущих стен в траншее их закрепляют анкерами или расстрелами в одно и то же время с разработкой грунта. По завершению разработки грунта возводят многоярусные перекрытия по всей глубине сооружения, начиная со дна котлована [9].

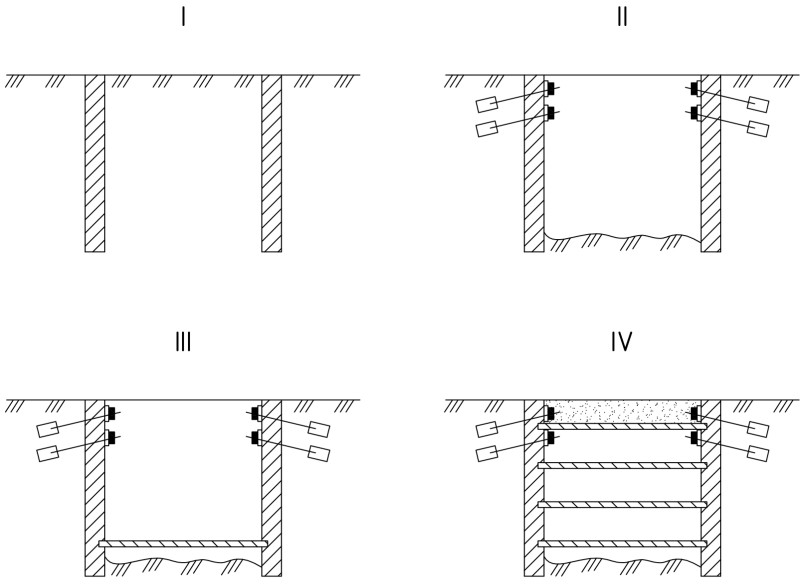


Рис. 1. Последовательность работ при строительстве подземных сооружений снизу-вверх: I – возведение несущих стен; II – закрепление стен анкерами и разработка грунта в котловане; III – возведение перекрытий; IV – засыпка котлована и восстановление поверхности

На рис. 2 сверху вниз (рис. 2) — когда несущие стены в траншее уже возведены, разрабатывают грунт на высоту яруса, а потом возводят перекрытие. При необходимости данный цикл может повторяться [10].

Проблема размещения крупногабаритной техники на строительной площадке при возведении подземного сооружения в условиях плотной застройки несет свои негативные последствия при строительстве.

На сегодняшний день нет четкого алгоритма, который позволил бы нам выбрать оптимальные параметры строительства при данном методе. Создание единого инструмента по комплексной оценке организационно-технологических решений позволило бы нам оптимизировать и повысить эффективность строительства по методу «Up-Down». В качестве такого инструмента предлагается использовать понятие «Потенциал организационно-технологических решений» [20].

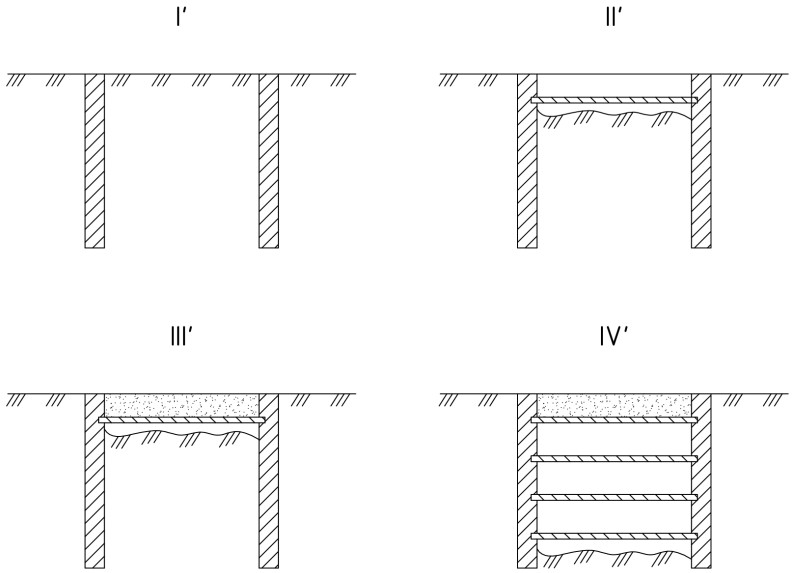


Рис. 2. Последовательность работ при строительстве подземных сооружений сверху-вниз: I ' – возведение несущих стен; II ' – раскопка котлована и возведение перекрытия; III ' – обратная засыпка и восстановление поверхности; IV ' – разработка грунта и возведение перекрытий

Организационно-технологические решения во многом зависят от целого комплекса взаимосвязанных друг с другом факторов [17]. Для полноценной оценки организационно-технологических решений необходимо использование следующих моментов:

в полной мере понимать поведение массива грунта под предполагаемым основанием;

производить постоянный мониторинг поведения грунта и деформационных характеристик застройки на протяжении всего строительства и на начальном этапе введения сооружения в эксплуатационный режим;

подобрать наиболее подходящих строительных машин с учетом условий, выявленных ранее;

организация труда рабочих и ИТР;

построение математической модели (количественная и качественная оценка).

Для реализации требуемого качества выполнения строительных работ необходимо, чтобы возможные отклонения от проекта соответствовали установленным допускам [11-15]. Для практического применения качественных характеристик необходимо располагать количественными показателями (критериями), которые позволяют отнести реальные строительные условия к той или иной группе сложных условий при использовании математического инструмента, позволяющего аналитическим способом оценить параметры рассмотренных факторов.

С помощью метода бинарной логистической регрессии можно исследовать зависимость переменных, имеющих только два возможных значения. Как правило, речь идёт о некотором событии, которое может произойти или

не произойти; бинарная логистическая регрессия в таком случае рассчитывает вероятность наступления события в зависимости от значений независимых переменных [16].

Ниже представлена множественная линейная регрессия, в которой зависимая переменная является линейной функцией независимых переменных,

$$y = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + \cdots + b_n \cdot x_n + a, \quad (1)$$

где x_1 – значения независимых переменных; b_1 – коэффициенты, расчёт которых является задачей бинарной логистической регрессии; a – некоторая константа.

Вычислив стандартные коэффициенты регрессии, можно оценить вероятность исхода события.

Также для решения данной проблемы можно применить следующее регрессионное уравнение:

$$p = \frac{1}{1+e^{-y}}, \quad (2)$$

где p – вероятность того, что произойдет данное событие или нет; e – основание натуральных логарифмов; у-стандартное уравнение регрессии [16].

Множество факторов зависит от возможностей строительных организаций: наличие финансов на приобретение наиболее эффективной техники, обучение высококвалифицированных кадров, наиболее точный и добросовестный мониторинг строительной конструкции и т.п. Соблюдение предложенного алгоритма поможет оптимизировать процессы, связанные с производством земляных работ при устройстве здания методом «Up-Down».

Выводы: проведенный анализ дал возможность установить проблему отсутствия единого подхода при возведении зданий методом «Up-Down». Формирование системы организационно-технологических решений, связанных с производством земляных работ, при строительстве здания таким методом позволит оптимизировать технико-экономические показатели, что является сегодня актуальной задачей. Принимая во внимание отечественный и зарубежный опыт, необходимо подойти к решению данной задачи комплексно, с использованием современных подходов и механизмов, которые позволят оптимизировать процессы, связанные с производством земляных работ при возведении зданий методом «Up-Down». В дальнейшем планируется проведение экспертного опроса, для выявления наиболее значимых параметров, которые были определены в данной работе, и формирование, на основе полученных значений, математической модели.

Список литературы

1. Копотилова А.С. Особенности строительства в условиях плотной городской застройки // Молодой ученый. 2017. С. 116-118.

2. Ильичев В.А., Голубев Г.Е., Замараев А.В., Скачко А.Н., Игнатова О.И., Буданов В.Г., Короткова О.Н. Руководство по комплексному освоению подземного пространства крупных городов // Москомархитектура, 2004. С. 70–73.

3. Шуплик М.Н. Анализ специальных способов строительства подземных сооружений в городских условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2013. С. 524–525.

4. Конюхов Д.С. Строительство городских подземных сооружений мелкого заложения. Специальные работы. М.: Архитектура-С, 2005. С. 7–80.

5. Картозия Б.А., Корчаков А.В. Классификация и критерии оценки сложных горно-геологических условий при строительстве подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень, 1996. С. 15–23.

6. Сопегин Г.В., Сурсанов Д.Н. Перспективы применения технологии строительства методом «Top-Down» в условиях города Перми // Вестник ПНИПУ, 2016. С. 148–151.

7. Ткаченко А.И. Технология строительства методом «Top&Down» // Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. С. 821–823.

8. Казакова Н.Е. Повышение квалификации как фактор обеспечения компетентности персонала при строительстве телекоммуникационных объектов и сооружений связи // Электронный научный журнал «Век Качества», 2016. №3. С.3–4.

9. Юркевич П.Б. Возведение монолитных железобетонных перекрытий при полузакрытом способе строительства подземных сооружений // Подземное пространство мира, 2002. №1. С. 13–22.

10. Топчий Д.В., Кочурина Е.О., Залманов А.А. Технология «Top and down» // Международный центр по развитию и внедрению механизмов саморегулирования, 2016. С. 7–10.

11. Айгумов М.М., Снарский В.И., Снарский С.В. Технология возведения подземных сооружений // Издательство Саратовский государственный технический университет, 2009. С. 24–30.

12. Chang-Yu Ou. Deep Excavations. Theory and Practice // London: Taylor & Francis, 2006. С. 459–498.

13. Ершов М.Н., Лапидус А.А., Теличенко В.И. Технологические процессы в строительстве. Книга 2. Технологические процессы переработки грунта // Издательство АСВ, 2016. С. 41–57.

14. Штоль Т.М., Теличенко В.И., Феклин В.И. Технология возведения подземной части зданий и сооружений. М.: Стройиздат, 1990. С. 99–142.

15. Леденев В.В., Ярцев В.П. Обследование и мониторинг строительных конструкций зданий и сооружений. Тамбов: Издательство ТГТУ, 2017. С. 115–180.

16. Жилина Е.В. Использование бинарной логистической регрессии для оценки качества адаптивного теста // Вестник Томского государственного университета, 2010. С. 106.

17. Бидов Т.Х. Организационно-технологические и управленческие решения использования методов неразрушающего контроля при возведении монолитных конструкций // Научное обозрение, 2017. № 13. С. 54-57.

18. Бидов Т.Х., Аветисян Р.Т. Формирование производственно-технологических модулей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 12. С. 496-498.

19. Бидов Т.Х., Аветисян Р.Т. Разработка организационно-технологической модели потенциала устройства временного крепления стенок выемок при производстве работ нулевого цикла // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 12. С. 427-431.

20. Лапидус А.А. Потенциал эффективности организационно-технологических решений строительного объекта // Вестник МГСУ. 2014. № 1. С. 175 – 180.

21. Лапидус А.А., Бидов Т.Х. Формирование производственно-технологических модулей, обосновывающих использование методов неразрушающего контроля при возведении монолитных конструкций гражданских зданий // Наука и бизнес: пути развития. 2019. №1. С. 31-36.

22. Хаев Т.Э., Аветисян Р.Т. Факторы, влияющие на принятие организационно-технологических решений при выборе конструктивных методов креплений стенок выемок и котлованов // Наука и бизнес: пути развития, 2019. С. 85-87.

23. Хубаев А.О. Описание эксперимента при расчете потенциала производства зимнего бетонирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 2. С. 247-252.

24. Хубаев А.О., Бидов Т.Х. Организационно-технологический потенциал использования методов неразрушающего контроля при производстве бетонных работ в зимний период // Наука и бизнес: пути развития – 2018. №4. С. 101-104.

25. Хубаев А.О., Бидов Т.Х. Организационно-технологический потенциал использования методов неразрушающего контроля при производстве бетонных работ в зимний период // Наука и бизнес: пути развития, 2018. С. 101-104.

26. Lapidus A., Bidov T., Khubaev A. The study of the calibration dependences used when testing the concrete strength by nondestructive methods // MATEC Web of Conferences. 2017. V. 117. P. 00094. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201711700094.

27. Lapidus A., Khubaev A., Bidov T. Organizational and technological solutions justifying use of non-destructive methods of control when building monolithic constructions of civil buildings and structures // MATEC Web of Conferences. 2019. V. 251. P. 05014.

28. Lapidus A., Khubaev A., Bidov T. Development of a three-tier system of parameters in the formation of the organizational and technological potential of using non-destructive testing methods // E3S Web of Conferences. 2019. V. 97. P. 06037. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199706037.

29. Lapidus A., Kangezova M., Bidov T. Systematization of organizational and technological aspects of scientific technical support of buildings and constructions over 100m high // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 698. P. 022091.

Бидов Тембот Хасанбиевич, старший преподаватель, tembot07@bk.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,

Коновалов Владимир Сергеевич, студент, mr.konovalov1999@mail.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,

Байсякина Ксения Сергеевна, студент, xeniya-bay@yandex.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

OPTIMIZATION OF PROCESSES ASSOCIATED WITH THE PRODUCTION OF EARTHWORKS DURING THE CONSTRUCTION OF A BUILDING USING THE «UP-DOWN» METHOD

T.Kh. Bidov, V.S. Konovalov, K.S. Baysyakina

The article provides an overview of the method of building construction using the «Up-Down» construction method. A number of technical processes related to the phased production of earthworks using this method are presented. A scientific and technical hypothesis is proposed, which consists of a proposal to improve the efficiency of the construction of the underground part of the building using the «Up-Down» method. The factors that influence the adoption of organizational and technical decisions during construction are identified. The scientific base for forming a tool for a comprehensive assessment of organizational and technological solutions in the production of the underground part of the building using the «Up-Down» method has been formed.

Key words: «Up-Down» construction method, optimization of construction processes, organizational and technological potential.

Bidov Tembot Khasanbievich, senior lecturer, tembot07@bk.ru, Russia, Moscow, National research Moscow state University of civil engineering,

Konovalov Vladimir Sergeevich, student, mr.konovalov1999@mail.ru, Russia, Moscow, National research Moscow state University of civil engineering,

Baysyakina Ksenia Sergeevna, student, xeniya-bay@yandex.ru, Russia, Moscow, National research Moscow state University of civil engineering

СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ

УДК 658.562

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ ОБОРОННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В.Б. Афанасьев

В статье обоснованы технические решения построения системы управления базы данных, выбор программных решений для автоматизированной информационной системы в целях обеспечения результативности системы менеджмента качества оборонного предприятия. Для оборонных предприятий представлен инновационный программный продукт на основе нереляционных NoSQL разработок.

Ключевые слова: информационная система, СУБД, качество, надёжность, информационная среда СМК.

Результативность действующей в настоящий момент системы менеджмента качества (СМК) на наукоёмких машиностроительных и приборостроительных предприятиях оборонно-промышленного комплекса (ОПК) России определяются множеством факторов, важнейшим из которых является фактор информационного обеспечения. Внедрение информационных систем на предприятиях ОПК связано с многочисленными трудностями, обусловленными, в частности, низким уровнем инновационной активности отечественных организаций, вымыванием научного потенциала в период либерализации экономики, а также типичным, для возрастного контингента работников, отрицанием необходимости каких-либо перемен для традиционных методов работы и управления производством. Одновременно с этим объединение на современном этапе предприятий ОПК в вертикально интегрированные структуры (ВИС) Концерны, позволяющее осуществлять централизацию управления, в том числе в системе обеспечения качества и надёжности, ставит новую задачу формирования и обслуживания дополнительных информационных потоков в рамках ВИС.

Таким образом, для решения проблем с качеством ОП в первую очередь необходимо обеспечить применение инновационных технологий в сфере информационной поддержки изделий (ИПИ) на этапах жизненного цикла (ЖЦ), а также построение информационных систем поддержки принятия решений для системы СМК и автоматизированных систем управления предприятиям.

Суть концепции ИПИ, получившей в США название CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support - непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла), состоит в применении информационных принципов и технологий в интегрированной информационной среде (ИИС) предприятия или группы предприятий в целях обеспечения управления процессами и взаимодействия всех участников ЖЦ выпускаемой продукции. ИИС - основа, ядро CALS - представляет собой распределенное хранилище данных, существующее в сетевой компьютерной системе, охватывающей (в идеале) все службы и подразделения предприятия, связанные с процессами ЖЦ изделий.

В соответствии с концепцией CALS управление проектно-конструкторскими данными на предприятии в том числе информационными потоками, информационным обеспечением СМК в части качества и надежности продукции и технологических систем на передовых зарубежных предприятиях осуществляется PDM-системой (Product Data Management — управление данными об изделии), являющимся прикладным программным средством.

В настоящее время по оценкам специалистов насчитывается несколько сотен прикладных специализированных программных средств, как зарубежной, так и отечественной разработки, предназначенных для управления данными о выпускаемой продукции [1]. Готовые программные продукты характеризуются различными свойствами и возможностями, отражающими специфику технологических процессов и выпускаемой продукции, в интересах которых эти автоматизированные информационные системы (АИС) разрабатывались. Соответственно с этим в реальных условиях информационно-технологического отставания отечественного ОПК возникают проблемы выбора и обоснования возможных решений по внедрению PDM-системы. За последнее время в ряде научных работ предложены методики выбора PDM-системы из числа готовых специализированных решений в том числе и для предприятий ОПК. Однако в большинстве случаев предложенные методики носят общий не системный характер с использованием ограниченного количества критериев [1, 2] или предлагается формировать иерархическую структуру исходных данных для анализа альтернативных проектов (PDM-систем) и предъявляемых к ним требований [3]. Последнее требует глубокого изучения огромного количества альтернативных АИС, а также тщательной формализации элементов ЖЦ выпускаемой продукции и производственных процессов, что в условии отсутствия подготовленных специалистов становится невозможным или очень затратным.

Одновременно с проблемами выбора готовых специализированных программных продуктов следует учитывать факт опережающего развития базовых программно-информационных решений, появление новых инновационных программных технологий в том числе и в построении БД и СУБД. Это обстоятельство позволяет искать пути создания новых АИС для предприятий путем внедрения инновационных программных продуктов.

Опыт отечественных предприятий ВИС ОПК по внедрению готовых информационных продуктов с возможным реинжинирингом или организации разработки новых прикладных программных средств демонстрирует практическое отсутствие единых стандартов, рекомендаций, а также аналитической базы и системного подхода к выбору оптимального решения. Внедренная в таких условиях PDM-система обычно не приносит требуемого экономического эффекта, а устранение ошибок, допущенных при ее внедрении, влечет немалые финансовые и временные затраты. Таким образом практика показывает, что в настоящее время комплексная задача разработки, выбора и внедрения PDM-системы на предприятиях ВИС ОПК остаётся не решённой. При этом эта проблема недостаточно раскрыта как в действующих стандартах, так и в научной литературе. Синтезу, выбору технических решений при построении АИС в интересах СМК предприятий ВИС ОПК посвящена данная работа.

Решение задачи по информационному сопровождению системы управления качеством и надёжностью предприятий ВИС ОПК требует разработки АИС, обеспечивающей накопление и оперативный доступ к статистической информации, в том числе в ряде сложных случаев к параметрическим данным проверок и испытаний, по всем выпускаемым изделиям и их комплектующим компонентам за длительный (несколько месяцев и даже лет) периоды разработки, производства и эксплуатации, а также эффективную обработку разнородной информации с элементами машинного обучения. В этой связи фундаментом построения АИС в интересах СМК предприятия должна являться высокоэффективная система управления баз данных (СУБД), обеспечивающая решение широкого спектра вопросов.

С точки зрения системного подхода задача проектирования СУБД состоит в определении ее структурно-функциональной организации (СФО). В составе СФО СУБД присутствуют следующие основные компоненты:

архитектура организации и построения СУБД, как программного комплекса;

схема данных, т.е., архитектура набора структурных связей классов данных (массивов в нереляционной модели и таблиц в реляционной модели);

программная реализация СУБД.

Соответственно основные компоненты, а также СФО СУБД в целом применительно к рассматриваемому проекту разработки АИС предприятия должны отвечать следующим требованиям:

Во-первых, при разработке АИС предприятия обязательно должны учитываться особенности производства и эксплуатации продукции предприятий ОПК, а также характер самой информации при выборе способов организации интеграции и первичной обработки статистической информации о качестве и надёжности изделий на различных этапах ЖЦ.

Во-вторых, необходимо обеспечить хранение всей информации по результатам ЖЦ продукции, поступающей за длительный промежуток времени.

В-третьих, должен быть реализован оперативный доступ к данным для анализа и обработки статистической информации в целях выработки мероприятий и управленческих решений по обеспечению качества продукции и технологических процессов, в том числе с использованием методов машинного обучения.

В-четвёртых, проблемы внедрения всеобщего менеджмента качества (TQM) в ВИС ОПК безусловно выразятся в необходимости обработки больших объёмов неструктурированной, нечёткой, развивающейся информации поэтому организация базы данных (БД) АИС должна обеспечивать наращивание информационного потенциала без дорогостоящего реинжиниринга БД в процессе развития проектов по обеспечению качества.

Поэтому, на начальном этапе при проектировании АИС крайне важно решение задачи обоснования СФО СУБД, обеспечивающей реализацию вышеуказанных требований, при этом одним из наиболее важных моментов является управление доступом, хранением и использованием информации. Функциональная и эффективная работа современных средств автоматизации невозможна без специализированных средств хранения и обработки информации. С увеличением объемов информации и сложности производимых вычислений возрастают требования к СУБД, которые являются ядром современных АИС с точки зрения обеспечения доступа к данным. Достаточная производительность СУБД при сохранении функциональности и надежности позволяет обеспечить необходимый уровень гибкости и удобства доступа к данным.

Следует отметить, что БД представляют собой совокупность данных, хранимых в соответствии со схемой данных, манипулирование которыми выполняют в соответствии с правилами средств моделирования данных [4]. БД и СУБД характеризуется следующими основными параметрами:

скорость доступа к данным на чтение и запись;

отказоустойчивость;

удобство доступа к данным;

масштабируемость.

При работе БД доступ к хранимой информации, так или иначе, получают все приложения в АИС: источники информации, расчетные модули, средства визуализации и т.д. Интенсивность и характер взаимодействия приложений с СУБД различны и определяются функциональностью приложений и спецификой хранимых данных. БД является централизующим звеном в работе любой АИС с функциями поддержки принятия решения. От характеристик её работы, от удобства доступа к данным зависит работа всего комплекса, т.е., при большом количестве обращений к БД, именно она может быть узким местом комплекса с точки зрения производительности. Эффективность работы СУБД и БД зависит от используемых программных средств, осуществляющих доступ к данным, модели данных и производительности используемого оборудования.

На настоящий момент существует большое количество систем управления хранением данных, удовлетворяющих различным запросам. Проектирование БД и СУБД – динамично развивающаяся область создания программного обеспечения, причём различие задач порождает разнообразные по характеристикам и целям применения решения по организации хранилищ данных [5, 6]. Необходимо при этом отметить, что закрытые код и архитектура коммерческих БД не позволяют рассматривать их в качестве средства управления хранением данных для АИС предприятий ОПК. В любом случае, не зависимо от выбора между новой разработкой БД и готовым продуктом возникает вопрос – какая технология из существующих на настоящий момент предпочтительней? Ответ на этот вопрос зависит от особенностей проекта, целей и задач, которые планируется достичь и решить соответственно. В рассматриваемом случае перечень задач по построению ИИС СМК, а также ряд особенностей информационных потоков предприятий ВИС ОПК описан в [7].

Не ставя в данной работе целью проведения детальных сравнительных оценок существующих программных решений в построении АИС, постараемся сформировать основные положения, позволяющие выработать правильные стратегические решения в масштабах предприятия ВИС ОПК для обеспечения быстрого информационного развития. Это позволит минимизировать проблемы реинжиниринга из-за возможных ошибок в описании моделируемых процессов и расширения диапазонов решаемых задач в СМК (TQM).

В мире технологий БД существует два основных сложившихся на настоящий момент направления: SQL и NoSQL, реляционные и нереляционные базы данных. Различия между ними определяются принципами декомпозиции сложной системы, а именно структурный и объектно-ориентированный [8], и заключаются в том, как они спроектированы, какие типы данных поддерживают, как хранят информацию. Реляционные БД хранят структурированные данные, сгруппированные в таблицах, формат которых задан на этапе проектирования виртуального хранилища. Нереляционные БД устроены иначе. Например, документно-ориентированные базы хранят информацию в виде иерархических структур данных. Речь может идти об объектах с произвольным набором атрибутов. То, что в реляционной БД будет разбито на несколько взаимосвязанных таблиц, в нереляционной может храниться в виде целостной сущности.

Внутреннее устройство различных систем управления базами данных влияет на особенности работы с ними. Например, нереляционные базы лучше поддаются масштабированию. Здесь следует также отметить, что некоторые реляционные СУБД поддерживают ряд технологий объектно-ориентированного подхода, например, наследование.

Область применения проектируемой системы также выдвигает ряд требований к используемым архитектурным и программным решениям, определяющих в конечном итоге логику построения АИС. Так, например, согласно практике построения средств автоматизации управления войска-

ми (c4i – command, control, communication, intelligence) ведущими американскими и европейскими компаниями (ThalesGroup, RaytheonCompany, LockheedMartin, NorthropGrumman), для систем управления тактического звена используется «толстый» клиент, при автоматизации оперативного и выше – «тонкий».

Под «тонким» клиентом подразумевается перенос большей части задач по обработке информации на сервер. Соответственно, толстый клиент обеспечивает пользовательским приложениям расширенную функциональность частично независимо от центрального сервера, часть задач по хранению и обработке данных выполняется на стороне клиента.

При проектировании АИС, значительное количество расчетных задач, большой объем и сложные взаимные связи хранимых данных, требуют соответствующих решений в виде производительных СУБД. В то же время, частота обновления информации, а также важность актуальных данных применительно к обработке поступающей информации с изделия требуют создания эффективных механизмов распределения данных. Основной проблемой разработки СУБД АИС является разнородность хранимых данных.

В целом, для каждого готового программного решения, в соответствии с его внутренней архитектурой, существуют данные с «наиболее подходящим» набором свойств, обрабатываемые с наибольшей для данного решения эффективностью и данные с «менее подходящим» набором свойств, обработка которых используемым программным решением затруднена. В то же время, учитывая значительную разнородность хранимых данных, жесткие требования к достоверности оценок и эффективности принимаемых на их основе решений определяет необходимость поиска оптимальных решений для обеспечения производительности АИС при устойчивой фрагментации и согласованности данных.

Таким образом, из приведенного обзора современных средств управления хранением и обработки данных следует, что каждое решение имеет свои достоинства и недостатки, и, при проектировании системы управления, выбор или разработку СУБД следует осуществлять, исходя из предметной области задач и поставленных требований. При этом основным принципиальным моментом при выборе программной архитектуры АИС является сравнительная, альтернативная оценка реляционной и нереляционной моделей СУБД.

В настоящее время не существует баз данных, которые подойдут для решения абсолютно всех проблем. Именно поэтому многие компании используют и реляционные, и нереляционные БД для решения различных задач. Хотя NoSQL-базы стали популярными благодаря быстродействию и хорошей масштабируемости, в некоторых ситуациях предпочтительными могут оказаться структурированные SQL-хранилища.

Наиболее часто используемыми реляционными клиент-серверными БД являются:

OracleDatabase, MSSQLServer – производительные коммерческие СУБД;

mySQL – популярная СУБД для web-ресурсов;

PostgreSQL – объектно-реляционная СУБД с открытым кодом.

Основанием для выбора реляционной SQL-базы при проектировании АИС могут являться следующие причины [9]:

1. Необходимость соответствия базы данных требованиям ACID (Atomicity, Consistency, Isolation, Durability — атомарность, непротиворечивость, изолированность, долговечность) [10, 11]. Это позволяет уменьшить вероятность неожиданного поведения системы и обеспечить целостность базы данных. Достигается подобное путём жёсткого определения того, как именно транзакции взаимодействуют с базой данных. Это отличается от подхода, используемого в NoSQL-базах, которые ставят во главу угла гибкость и скорость, а не 100% целостность данных.

2. Данные, которые требуется интегрировать и обрабатывать структурированы, при этом структура не подвержена частым изменением. Если предприятие или область применения АИС на предприятии не находится в стадии экспоненциального роста, вероятно, не найдётся убедительных причин использовать БД, которая позволяет достаточно вольно обращаться с типами данных и нацелена на обработку огромных объёмов информации.

В том случае если есть основания полагать, что база данных может стать узким местом проекта, находящегося в стадии становления и проработки, каким по существу является задача внедрения системы TQM на предприятиях ВИС ОПК, и основанного на работе с большими объёмами разнородной, неструктурированной информации, стоит посмотреть в сторону NoSQL-баз, которые позволяют то, чего не умеют реляционные БД [4]. Ниже представлены возможности, которые стали причиной популярности таких NoSQL баз данных, как MongoDB, CouchDB, Cassandra, HBase:

1. Хранение больших объёмов неструктурированной информации. База данных NoSQL не накладывает ограничений на типы хранимых данных. Более того, при необходимости в процессе работы можно добавлять новые типы данных.

2. Использование облачных вычислений и хранилищ. Облачные хранилища — отличное решение, но они требуют, чтобы данные можно было легко распределить между несколькими серверами для обеспечения масштабирования. Использование, для тестирования и разработки, локального оборудования, а затем перенос системы в облако, где она и работает — это именно то, для чего созданы NoSQL базы данных.

3. Быстрая разработка. Если вы разрабатываете систему, используя agile-методы, применение реляционной БД способно замедлить работу. NoSQL базы данных не нуждаются в том же объёме подготовительных действий, которые обычно нужны для реляционных баз.

Занимаясь поиском системы управления базами данных, можно выбрать одну технологию, а позже, уточнив требования, переключиться на что-то другое. Однако, разумное планирование позволит сэкономить немало времени и средств. Ниже приведены признаки проектов, для которых идеально подойдут SQL-базы:

имеются логические требования к данным, которые могут быть определены заранее;

очень важна целостность данных;

нужна основанная на устоявшихся стандартах, хорошо зарекомендовавшая себя технология, используя которую можно рассчитывать на большой опыт разработчиков и техническую поддержку;

А вот свойства проектов, для которых подойдёт что-то из сферы NoSQL:

требования к данным нечёткие, неопределённые, или развивающиеся с развитием проекта;

цель проекта может корректироваться со временем, при этом важна возможность немедленного начала разработки;

одни из основных требований к базе данных - скорость обработки данных, фрагментация, масштабируемость и кеширование;

обеспечение возможности перехода к распределённому способу хранения информации в условиях работы предприятий ВИС ОПК.

На предприятии АО «ГосНИИП», входящего в ВИС ОПК, по результатам анализа и формализации информационных потоков СМК [7], с учётом всего комплекса проблем с цифровизацией технологических процессов, стали очевидны недостатки реляционных SQL-разработок, в том числе базовых моделей системы 1С, связанными с необходимостью глубокого реинжиниринга, что значительно повышает стоимость проекта при значительных сроках разработки. Одновременно с этим существует необходимость моделировать структуру АИС в соответствии с действующими на предприятии форматами технологических процессов и нормативных требований без деформации сложившегося производства. Это в свою очередь обеспечит ускоренное внедрение программного продукта, в том числе за счёт снижения информационных рисков, связанных с противодействием новациям со стороны персонала предприятия, обусловленного человеческим фактором [12].

Из приведенного обзора следует необходимость разработки специализированной объектной СУБД, архитектура и основные принципы построения которой описаны в данном разделе.

Таким образом для хранения данных в БД АИС предприятия из зарекомендовавших себя информационных продуктов выбрана и успешно используется документно-ориентированная система управления базами данных MongoDB (далее система). Данный программный продукт является свободно-распространяемой высокопроизводительной системой с открытыми исходными кодами, реализованной в 2014 году на языке C++ компанией Mongo Inc [13].

В основе системы лежит использование массивов JSON-подобных документов вместо таблиц, позволяющих более удобно и эффективно моделировать данные с гибким набором полей. Хранение данных в коллекциях без определённой схемы позволяет избежать затратных по времени операций типа ALTER_TABLE добавления колонки к таблице в классических SQL базах, что позволяет новой системе добавлять дополнительные поля к некоторым документам «на лету».

Для повышения эффективности обработки запросов по мере увеличения объема хранения данных, система позволяет использовать механизм шардирования (разнесения базы данных по нескольким серверам). Данное свойство представляется особенно актуальным при организации информационных связей в цепочке "поставщик КИ - предприятие ВИС ОПК - Концерн", а также для разнесения при интегрировании разнотипной информации о качестве по нескольким предприятиям. Для отказоустойчивости система использует реплицирование (создание и поддержание нескольких копий данных в актуальном состоянии). Кроме того, реплики данных могут использоваться для повышения производительности обработки запросов по чтению данных (чтение из различных реплик).

Благодаря этим механизмам, а так же документно-ориентированной структуре данных, система показывает наилучшую производительность при обработке большого числа запросов по чтению данных, что наилучшим образом согласуется с тематикой её применения в текущей модели - построению большого числа отчетов и визуализации хранимых данных. Данные от независимых экспертов [14] по сравнению производительности Mongo Server и, к примеру, SQL server 2008, демонстрируют более быстрое выполнение запросов типа вставки объекта в 30-50 раз, запросов получения данных из базы в 3-5 раз, и запросов обновления данных в 5-8 раз.

Для тематической работы с системой был реализован веб-интерфейс на языке программирования Python, позволяющий производить учёт всей информации по дефектным комплектующим.

В разрабатываемом программном комплексе СУБД предназначена для учета и хранения информации об отказах базовых и комплектующих изделий, построении отчетов по ним, а так же хранению сопутствующих документов. Кроме этого в целях реализации автоматизированной программы принятия корректирующих производственных решений по состоянию выпускаемой продукции на различных этапах ЖЦ необходима организация хранения и обработки массивов параметрической информации, поступающей из производства, испытаний всех видов, а также эксплуатации. Организация хранения данных, их дальнейшая обработка, информационный обмен реализованы в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1.

Схема формирования параметрических данных для базовых и комплектующих изделий показана на рис. 2.

Представленная функциональная схема построения БД АИС предприятия имеет в своей основе модульную архитектуру аналогичную, используемой в АИС по обеспечению качества вооружения ведущими зарубежными компаниями. Так, например, компания Raytheon разрабатывает проект под названием DREAMachine (Defect/Test Reduction Empoweredby Analyticsand Machine Learning), в основу которого положено применение методов машинного обучения, позволяющих оперативно анализировать огромные объемы информации, распознавать сложные зависимости и прогнозировать требуемую выходную информацию для принятия решений на основе имеющихся данных. DREAMachine использует в своей основе мо-

дульную архитектуру (рис. 3) для достижения большей точности прогнозирования и глубокого понимания процессов на уровне системы. Такая архитектура позволяет, не прибегая к серьезным доработкам, интегрировать дополнительные источники данных по мере появления новой информации. Модульная архитектура информационной среды в проекте DREAMachine позволяет активно применять машинное обучение к традиционно разрозненным источникам данных с целью получения представления о функционировании системы в целом, что позволяет сократить время на проведение дополнительных испытаний и спрогнозировать возможные отказы системы в ходе ее дальнейшей работы. Собранные данные фильтруются, анализируются и объединяются в единой базе, связывая информацию о компонентах системы на всех ее уровнях [15,16].

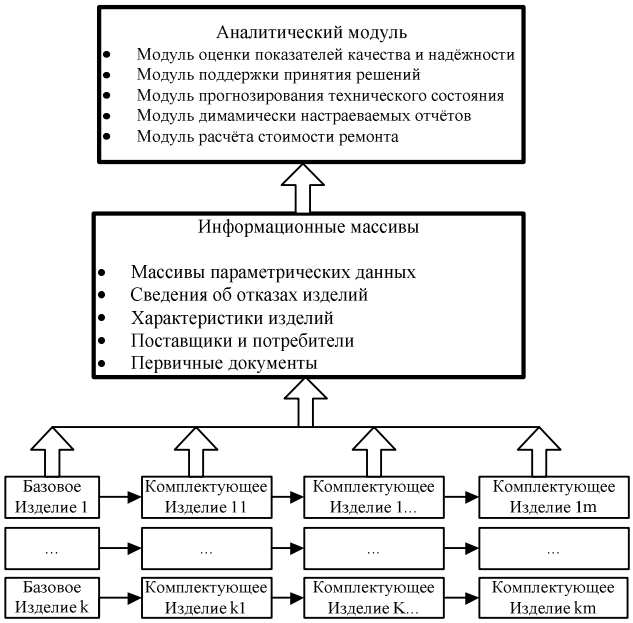


Рис. 1. Схема Архитектура информационной системы

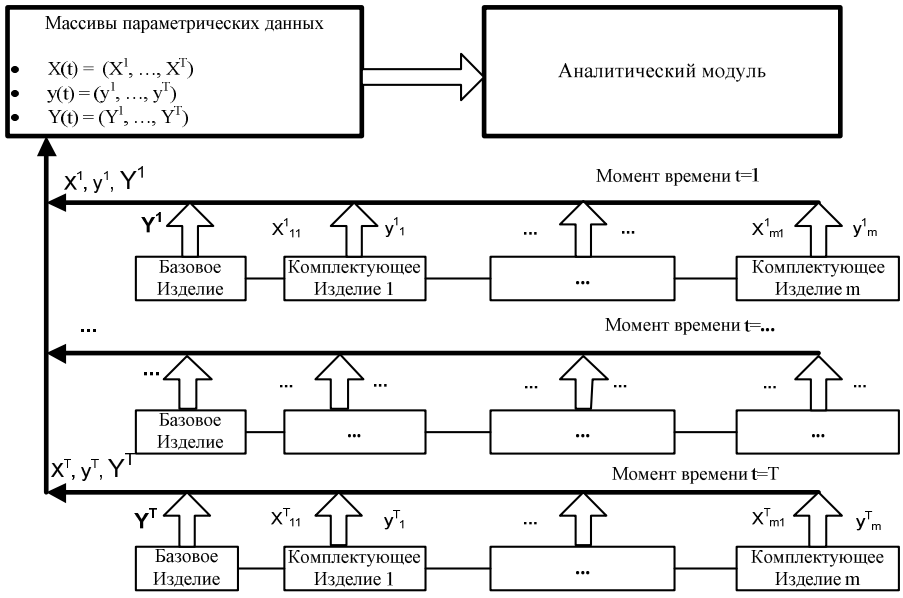


Рис. 2. Схема формирования параметрических данных АИС

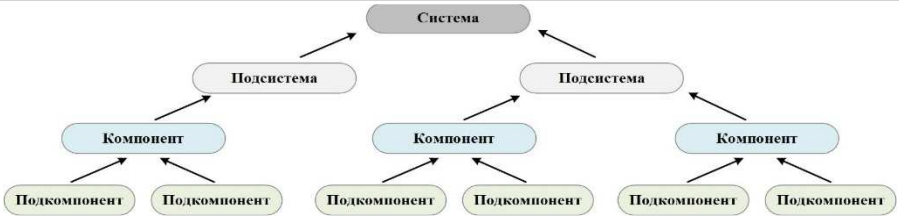


Рис. 3. Модульная архитектура системы, используемая в проекте DREAMachine

Использование при разработке БД АИС модульной архитектуры позволило эффективно реализовать возможности и преимущества нереляционной NoSQL-системы. В соответствии с этим объекты внутри БД АИС хранятся в виде коллекций (массивов), каждый из которых представляет собой группу документов. Две основные из них - products_collection и subproducts_collection отвечают за хранение основной информации об отказах базовых и комплектующих изделий.

В соответствии с выбранной архитектурой в виде отдельных массивов хранятся: сведений об отказах базовых изделий (БИ), выпускаемых ДО Концерна; сведений об отказах комплектующих изделий (КИ); наименования БИ и КИ; наименования Потребителей (Пользователей) оборудования производимого ДО Концерна; наименования Поставщиков (Производителей) оборудования; сканов первичных документов по отказам, ремонту и техническому состоянию; параметрические данные. Каждое БИ и КИ в представленных массивах могут быть связаны с единственным изделием базовым или комплектующим. Данные о базовых и комплектующих изделиях хранят набор полей, таких как номер, даты отказа, поступления в ремонт, восстановления, и многие другие. Каждому изделию в коллекции присватается уникальный идентификатор ObjectID, на основе которых организуется связь между базовыми и комплектующими изделиями. Все базовые и комплектующие изделия имеют поля subproducts, в которых хранится массив идентификаторов изделий, из которых состоит данное изделие. В свою очередь все комплектующие изделия имеют поле parent_product_id, в котором хранится идентификатор изделия, в состав которого входит данное.

Информация о документах (например, рекламационных актах, технических актах) хранится в виде массива вложенных документов. В случае, если к документу прикреплены его отсканированные копии, они хранятся в специализированной коллекции document_scans, оптимизация работы с которой основана на специализированных механизмах работы Mongo с бинарными данными.

База данных структурирована по датам, типам изделий, предприятиям потребителям-заказчикам, поставщикам комплектующих изделий, этапам жизненного цикла изделий, типам воздействий на изделия, характеру и видам отказов. Это позволяет обрабатывать и анализировать материал по группам с формированием требуемых отчётов, экспортировать материалы в другие информационные системы в формате Excel, а также про-

водить оценку достигнутого уровня качества, для этого в базу интегрированы инструменты расчётов вероятности безотказной работы (ВБР), плотности ВБР, наработки на отказ и частоты отказов.

Часть из полей БД сформирована с использованием списочных данных, что обеспечивает проведение выборки информации по критериям при построении специализированных отчётов. Порядок обработки, занесения, а также анализ информации реализован в соответствии с внутренними стандартами предприятия по вопросам рекламационной работы и исследованию отказов, учитывающими особенности производственного процесса.

Разработанная СУБД имеет классическую трехуровневую модель. Эта модель является расширением двухуровневой модели (клиент-сервер) и в ней вводится дополнительный промежуточный уровень между клиентом и сервером. Архитектура трехуровневой модели приведена на рис. 4.

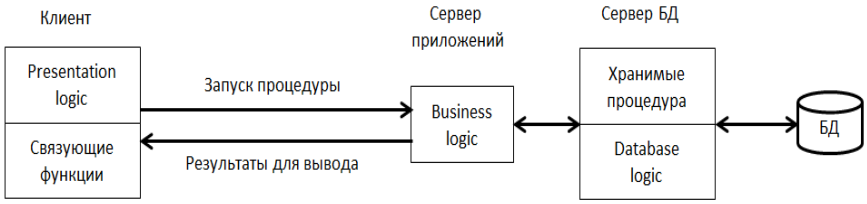


Рис. 4. Трехуровневая схема работы базы данных

Данная модель имеет три уровня. Первым уровнем является клиент, отвечающий за логику представления данных пользователю, а так же за логику управления этими данными конечным пользователем. На данном этапе клиент реализован в виде веб-интерфейса. Благодаря этому не требуется установки никакого дополнительного программного обеспечения на компьютер клиента. Текущая реализация клиента имеет поддержку большинства современных браузеров, в том числе: google chrome, safari, opera, mozilla firefox. Клиент представляет данные пользователю в виде загружаемых с сервера веб-страниц, генерируемых на сервере приложений. Часть страниц имеет динамическую структуру и содержимое, загружаемое с сервера при помощи дополнительных запросов к серверу.

Промежуточный уровень трехуровневой системы содержит один или несколько серверов приложений. В данной модели этот уровень представлен python-приложением, работающим на основе WSGI сервера waitress. Данное приложение отвечает за бизнес логику системы управления базой данных, а именно: генерация и направление необходимых запросов к серверу БД, генерация страниц и данных для отправки их пользователю, а так же контроль корректности заполнения БД. Генерация страниц сервером производится при помощи python-пакета flask, позволяющего разделить генерацию представления данных пользователю и логику СУБД.

Сервер базы данных отвечает за корректную загрузку и выгрузку данных из/в базу данных mongo. Реализация данного сервера использует объектно-ориентированный поход к работе с данными, при котором каждому типу объекта (изделиям, документам, наименованиям) соответствует

Python класс, предоставляющий удобный интерфейс для работы с данными типами (корректное добавление, модификация, удаление и загрузка комплектующих частей).

Таким образом, в процессе разработки и продвижения новой информационной системы, одновременно с использованием программных продуктов нового поколения, был реализован инновационный информационно-технологический подход к моделированию, программированию и структуризации элементов СМК без деформации сложившегося производства и в соответствии с действующими на предприятии форматами технологических процессов и нормативных требований. Это обеспечило высокую производительность и эффективность формирования информационных потоков СМК предприятия в кратчайшие сроки. Полученные результаты не могли быть достигнуты за счёт внедрения дорогостоящих, громоздких и в значительной мере устаревших реляционных информационных систем в том числе на базе 1С, требующих кроме всего прочего значительные расходы времени на реинжиниринг. Данное обстоятельство подтверждает высокую эффективность новой АИС и научную новизну информационно-технологического метода, предложенного для оцифровки процессов СМК на предприятиях ВИС ОПК.

Результаты работы по созданию БД были оформлены и зарегистрированы в Федеральной службе интеллектуальной собственности [17].

Список литературы.

1. Третьяк Л.Н., Косых Д.А., Рудь Н.А. Анализ информационного обеспечения системы менеджмента качества // Форум учёных. Материалы VII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум» [Электронный ресурс] URL: https:// scienceforum.ru/ 2015 / article/2015013842 (дата обращения: 11.01.2020).

2. Губарев А.В. Информационное обеспечение системы менеджмента качества [Электронный ресурс] URL: https://biblioclub.ru/ index.php? page=book_red&id=275224&razdel= (дата обращения: 09.01.2020).

3. Щеглов Д.К. Методика выбора PDM-системы для предприятия ракетно-космической отрасли // Инновации. 2011. №5. [Электронный ресурс] URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-vybora-pdm-sistemy-dlya-predpriyatiya-raketno-kosmicheskoy-otrasli (дата обращения: 09.01.2020).

4. Андреев А.М., Березкин Д.В., Самарев Р.С. Внутренний мир объектно-ориентированных СУБД // OSP – Гид по технологиям цифровой трансформации. Открытые системы архитекторам информационных систем. 2001. [Электронный ресурс] URL: https://www.osp.ru/ os/2001/ 03/ 179987/ (дата обращения: 08.12.19).

5. Дейт К. Дж. Введение в системы баз данных. М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. 1328 с.

6. Коннолли Т. Базы данных, проектирование, реализация и сопровождение. М.: Издательский дом «Вильямс». 2003. 1440 с.

7. Афанасьев В.Б., Медведев В.М., Остапенко С.Н., Палихов Г.В., Мамаев В.А. Инновационные технологии в управлении качеством и надёжностью продукции предприятий ОПК // Всероссийская научно-техническая конференция «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении». 2019. С. 273-275.

8. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++. М.: Издательство Бином, Спб: Невский диалект, 1998. 558 с.

9. Alon Brody. SQL или NoSQL — вот в чём вопрос // Хабр. 2017. 9 марта. [Электронный ресурс] URL: https://habr.com/ru/ company /ruvds/ blog/324936/ (дата обращения: 20.01.20).

10. Компания SOFTPOINT // Глава 7 - Свойства транзакций и системы (ACID). [Электронный ресурс] URL: http://www.softpoint.ru/ archive/ article_id368.php (дата обращения: 01.12.2019).

11. Gray Jim. The Transaction Concept: Virtues and Limitations. Proceedings of the 7th International Conference on Very Large Databases, 1981. P. 144 – 154.

12. Михайлов Ю.М. Властные коммуникации и фактор риска в сетевом обществе: социально-философский анализ [Электронный ресурс] URL: http://avtoref.mgou.ru/new/d212.155.08/Mihailov/diss.pdf (дата обращения: 10.02.2020).

13. MongoDB // The database for modern applications. [Электронный ресурс] URL: https://www.mongodb.com/ (дата обращения: 20.01.20).

14. Wu C. M., Huang Y. F., Lee J. Comparisons between mongodb and ms-sql databases on the twc website // American Journal of Software Engineering and Applications. 2015. Т. 4. №. 2. P. 35-41.

15. Электронный ресурс компании Raytheon (США) // [Электронный ресурс] URL: https://www.raytheon.com/sites/default/files/ technologytoday/ 2018/issue1/wp-content/uploads/2018/08/Raytheon_TechnologyToday_Issue1_2018.pdf (дата обращения: 09.09.2019).

16. Боев С.Ф., Рахманов А.А., Логовский А.С., Медведев В.М., Перлов А.Ю., Казанцев А.М. Современное состояние и направления совершенствования систем технического обслуживания комплексов специального назначения ведущих мировых военно-промышленных компаний // Вестник воздушно-космической обороны. 2018. №4 (24). С. 105 – 113.

17. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2018620285. База данных для оценки уровня качества выпускаемой предприятием продукции на всех этапах жизненного цикла / Афанасьев И.В., Афанасьев В.Б.; заявитель и правообладатель АО «ГосНИИП». №2017621619; заявл. 29.12.2017; регистр. В Реестре баз данных 16.02.18.

Афанасьев Виктор Борисович, начальник отдела, vicbor54@bk.ru, Россия, Москва, АО «ГосНИИП»

EXPERIENCE OF DESIGNING A SYSTEM OF INFORMATION SUPPORT OF PRODUCT QUALITY OF A DEFENSE ENTERPRISE

V.B. Afanasyev

The article presents and substantiates technical solutions for constructing a database management system, proposes a selection of software solutions for an automated information system designed to ensure the effectiveness of a defense enterprise's quality management system. An innovative software product based on non-relational NoSQL developments was proposed for military enterprises.

Key words: information system, DBMS, quality, reliability, information environment of the QMS.

Afanasiev Victor Borisovich, head of reliability, vicbor54@bk.ru, Russia, Moscow, JSC «GosNIIP»

УДК 005.6

ИНЖИНИРИНГ КАЧЕСТВА В КОНЦЕПТУАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ 3D-ПРИНТЕРА

Д.В. Ермилина, С.Н. Казандаева, А.О. Сергиенко, И.В. Русских

В статье предложено использование совокупности методов инжиниринга качества QFD, ТРИЗ и FMEA для концептуального проектирования 3D-принтера с более высокой точностью и сохранением времени изготовления. Подобный комплексный подход предполагает всестороннее рассмотрение процесса проектирования принтера и синергетический эффект от применения предложенного набора методов.

Ключевые слова: 3D-принтер, аддитивное производство, послойное наращивание, инжиниринг качества, QFD, ТРИЗ, FMEA, проектирование.

В настоящее время многие фирмы занимаются изготовлением 3D-принтеров для различных областей использования, поэтому конкуренция в этом экономическом секторе достаточно велика. Ситуация осложняется ещё и тем, что проектирование и производство 3D-принтеров - это наукоёмкий процесс, требующий значительных интеллектуальных вложений. При создании такого продукта важно не сделать ошибку ещё на этапе концептуального проектирования.

Аддитивные технологии (3D-печать) (Additive Manufacturing, AM) являются примером инновации в производстве. Технология 3D-печати заключается в «автоматизированном получении изделия послойным наращиванием (принцип «сложения») на специальном оборудовании – 3D-принтере, в соответствии с компьютерной информационной моделью этого изделия и под управлением технологических программ (числовое программное управление – ЧПУ)» [1]. Все больше предприятий внедряют аддитивные технологии в производство. В ежегодном докладе WohlersReport 2019 прогнозируется, что оборот в индустрии 3D-печати в 2020 году составит 15,8 миллиардов долларов [2]. В таких условиях для сохранения конкурентоспособности даже новую технологию, необходимо постоянно улучшать и совершенствовать.

Важным способом решения поставленной перед производителями задачи сохранения конкурентоспособности является применение инструментов инжиниринга качества, позволяющих максимально эффективно и с использованием новых технических решений спроектировать продукт, способный удовлетворить не только заявленные требования потребителя, но и невысказанные. «Под инжинирингом качества понимается методология проектирования и создания продукции с использованием инженерных принципов, основанных на четких формализованных процедурах с целью совместной оптимизации качества продукции, издержек производства и пунктуальности организационно-управленческой деятельности» [3].

Концептуальное проектирование – важнейший этап разработки технической системы, на котором производится описание замысла системы: формулируется необходимость создания системы, осуществляется постановка проблемы, которая будет решаться с помощью данной системы, идентифицируются участники разработки (особое внимание уделяется конечному потребителю), разрабатывается концепция эксплуатации и идентифицируются возникающие ограничения.

На примере разработки 3D-принтера рассмотрена совокупность методов инжиниринга качества QFD, ТРИЗ и FMEA, которая, по мнению авторов, позволяет с помощью нетривиальных, и даже абсолютно новых технических решений создать на этапе концептуального проектирования конкурентоспособный продукт, удовлетворяющий и предвосхищающий желания потребителей.

Объект исследования. Существует множество разновидностей 3D-принтеров. Объектом исследования в представленной работе является 3D-принтер LulzBot Mini, печатающий по методу послойного наращивания (FDM) (рис. 1).

Относительно дешовая стоимость FDM-принтеров и расходных материалов характеризуется широкой популярностью этой технологии. Конкурентами LulzBot Mini являются принтеры Wanhao Duplicator i3 Plus Mark II и Picaso DesignerX Pro.

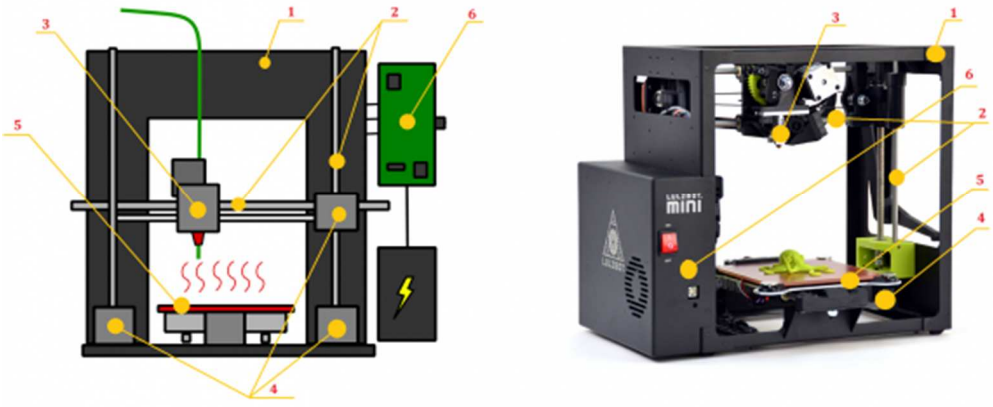


Рис. 1. Типовая конструкция 3D-принтера LulzBot Mini [4]

Проведен структурно-функциональный анализ принтера. Результаты в обобщенном виде могут быть представлены следующим образом.

1. Корпус, играющий роль каркаса для монтажа конструкционных элементов. К корпусу крепятся направляющие, двигатели, рабочий стол, а также модуль управления;

2. Направляющие, осуществляющие относительно свободное перемещение печатающей головки в заданном пространстве согласно условиям печати;

3. «Печатающая головка (экструдер) – группа частей, которая выполняет подачу проволоки, ее нагрев и вытеснение (экструзию) расходного материала через сопло на рабочую поверхность»[4]. Движение печатающей головки, скорость подачи проволоки и расплавленного пластика обуславливается заданным алгоритмом;

4. «Шаговые двигатели – элементы конструкции 3D-принтера, отвечающие за равномерное перемещение печатающей головки в пространстве на заданное расстояние» [4];

5. «Рабочий стол – строительная платформа 3D-принтера, на которой и осуществляется непосредственное создание трёхмерного объекта»[4]. Он может перемещаться по одной из осей, а также нагреваться для склеивания рабочей поверхности и первого слоя печатаемой детали;

6. «Модуль управления – набор элементов, отвечающий за управление и координацию действий принтера в процессе печати» [4]. Отвечает за перемещения направляющих по трем координатным осям, вольтамперные характеристики и температуру нагрева.

Для полноты понимания сущности предложенного подхода, рассмотрим применение каждого из методов последовательно.

Развертывание функции качества (QFD). QFD – метод развертывания функции качества, обеспечивающий высокое качество создаваемой продукции с гарантией получения конечного результата, соответствующего требованиям и ожиданиям потребителя [5].

QFD является эффективным инструментом инжиниринга качества, позволяющим на самом раннем этапе жизненного цикла установить связь между требованиями потребителя и техническими решениями, возможными для конкретного продукта.

Особенно важно использовать инструмент QFD для таких сложных, наукоемких изделий, как 3D-принтер. Это связано с тем, что использование инновационных аддитивных технологий в настоящее время находится на этапе бурного внедрения во многие сферы производства и быта. При правильном использовании QFD минимизируется риск создания неактуального для рынка потребителя продукта и максимизируется его конкурентоспособность.

В данной работе рассмотрен только первый уровень QFD. Для построения первого дома качества требования потребителя были переведены в обобщенные характеристики 3D-принтера. После этого был проведен анализ корреляции технических характеристик и анализ их корреляции с требованиями потребителя. Результаты представлены на рис. 2 [6].

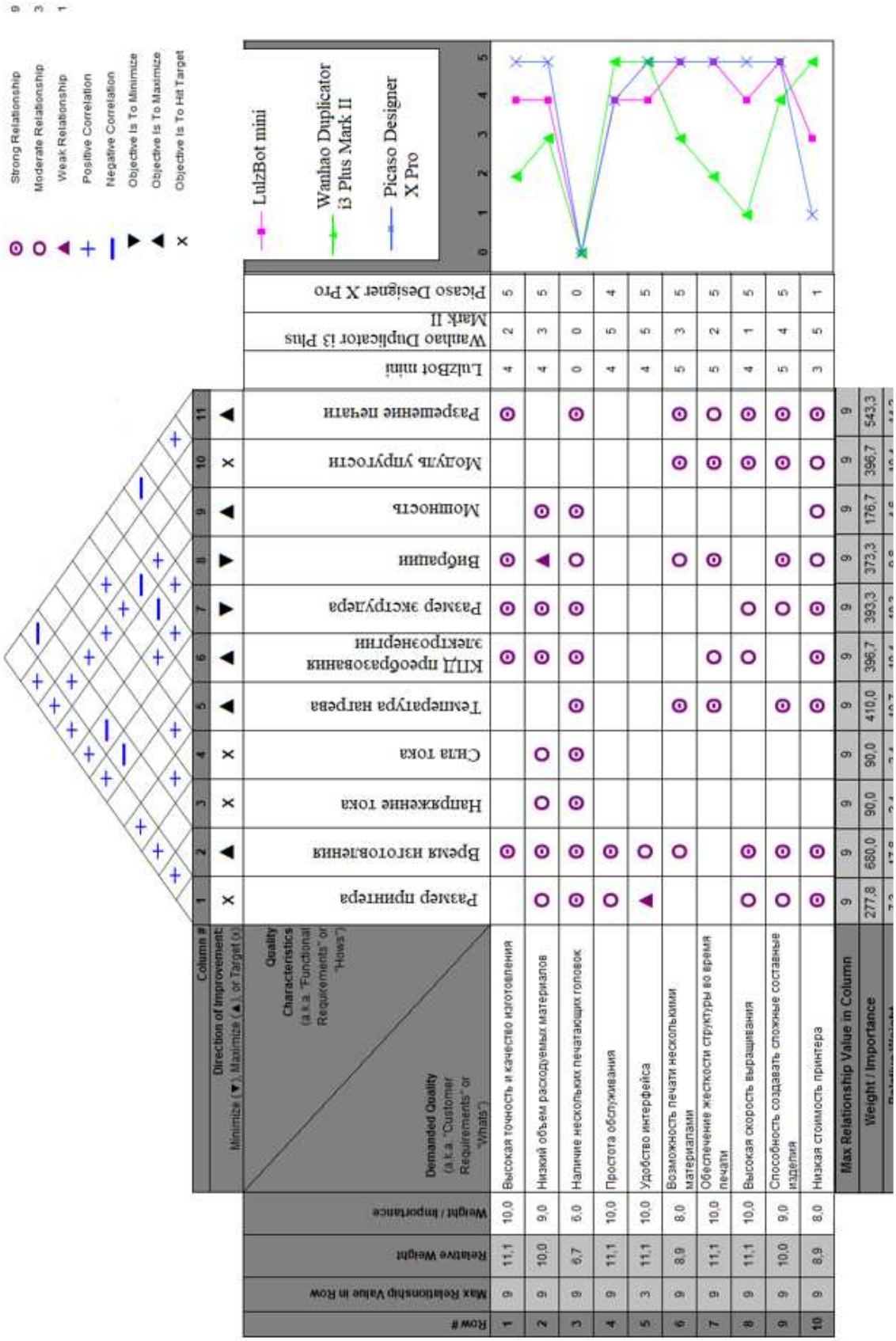


Рис. 2. QFD 3D-принтера LulzBot Mini

Проведенный QFD позволил идентифицировать приоритетные технические характеристики, обладающие наибольшим относительным весом. Также был определен относительный вес требований потребителя, позволяющий ранжировать их по важности.

Для повышения уровня конкурентоспособности 3D-принтера на рынке в первую очередь необходимо делать акцент на требованиях и характеристиках, обладающих наибольшим относительным весом. Среди требований потребителей наибольшим относительным весом обладают: высокая точность и качество изготовления (11,1), простота обслуживания (11,1), удобство интерфейса (11,1), обеспечение жесткости структуры во время печати (11,1) и высокая скорость печати (11,1). К наиболее важным техническим характеристикам 3D-принтера следует отнести: время изготовления (17,8), разрешение печати (14,2), температура нагрева (10,7), КПД преобразования электроэнергии (10,4), модуль упругости (10,4) и размер экструдера (10,3).

Одной из главных проблем современного проектирования и создания продуктов является вопрос отрицательной корреляции характеристик. В терминах ТРИЗ это называется техническим противоречием, которое необходимо творчески разрешить, чтобы создать конкурентоспособный продукт. В рамках данной статьи выделим две технические характеристики с отрицательной корреляцией, обладающие наибольшими относительными весами: время изготовления (17,8) и разрешение печати (14,2). Кроме того, выбранные технические характеристики напрямую коррелируют с ключевыми требованиями потребителя, обладающими наибольшим относительным весом: высокая точность и качество изготовления (11,1) и высокая скорость выращивания (11,1).

Сформулируем задачу следующим образом: спроектировать 3D-принтер, позволяющий значительно повысить точность выполнения размеров изготавливаемых на нем изделий без увеличения времени изготовления.

Главное преимущество использования QFD заключается в возможности реализации важнейшего требования современного рынка – ориентации на потребителя. Этот принцип отсутствует в методологии ТРИЗ, что в сегодняшней экономической обстановке не позволяет использовать её обособленно от других инструментов инжиниринга качества

Следовательно, необходимо использовать совокупность методов, которая позволит комплексно подойти к концептуальному проектированию продукта. И следующим этапом, после применения QFD, является ТРИЗ, который даст возможность действовать нетривиально, предоставляя потенциал найти абсолютно новый, возможно даже инновационный, подход к решению поставленной задачи.

Теория решения изобретательских задач. «Структура системы в ТРИЗ моделируется с помощью функционального и вепольного анализа. Вепольный анализ предназначен для представления исходной системы в виде определённой (структурной) модели и преобразования её для получения структурного решения, устраняющего недостатки» [7].

«Структурный вещественно-полевой (вепольный) анализ - раздел ТРИЗ, изучающий и преобразующий структуру технических систем» [7]. «Вепольный анализ позволяет представить структурную модель исходной технической системы, выявить ее свойства, с помощью специальных правил преобразовать модель задачи, получив тем самым структуру решения, которое устраняет недостатки исходной задачи» [8].

«Веполь - модель минимально управляемой системы, состоящей из двух взаимодействующих объектов и их взаимодействия» [7].

Обозначим каждые взаимодействующие объекты за вещества и назовём их на схеме буквой «В», а поля, через которые могут взаимодействовать эти вещества, назовём «П». Разложим 3D-принтер на составляющие его объекты и поля и обозначим воздействия элементов друг на друга (рис. 3).

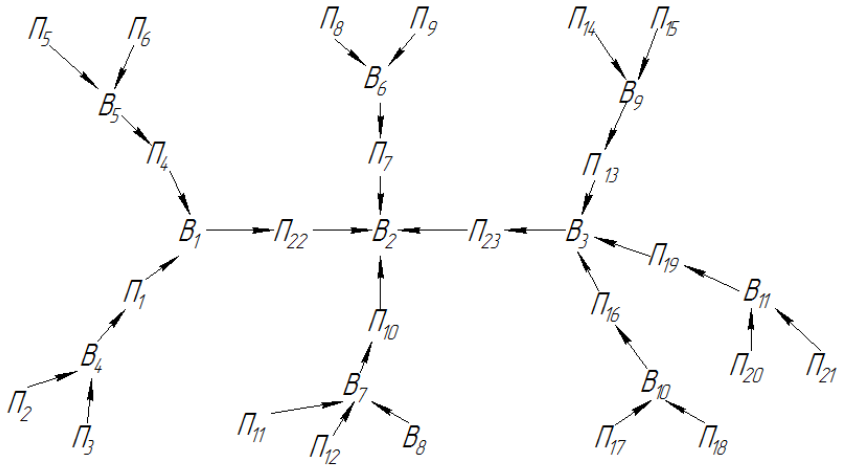


Рис. 3. Вепольный анализ 3D-принтера

Для начала выделим три рабочих части: $В_1$ - стол; $В_2$ – филамент; $В_3$ - экструдер. Стол и экструдер воздействуют на пластик через тепловые поля $П_{22}$ и $П_{23}$ соответственно.

На стол $В_1$ воздействует механическое поле $П_1$, предназначенное для перемещения стола в направлении оси X и вырабатываемое электродвигателем $В_4$. На электродвигатель воздействуют электромагнитное поле $П_2$, для совершения движения, и информационное поле $П_3$, для регулирование расстояния перемещения. Так же на стол действует тепловое поле $П_4$ для нагревания стола. Оно вырабатывается нагревательным элементом $В_5$ с помощью электромагнитного поля $П_5$ и информационного поля $П_6$, регулирующего температуру нагрева.

На филамент $В_2$, кроме теплового воздействия со стороны стола и экструдера, воздействует механическое поле $П_7$, вырабатываемое электродвигателем $В_6$, для подачи пластика к головке экструдера. Электромагнитное поле $П_8$ и информационное поле $П_9$ воздействуют на электродвигатель для совершения действия и регулирования скорости подачи филамент. Так же на материал действует механическое поле $П_{10}$, создаваемое двигателем $В_7$ для охлаждения пластика. Этот двигатель преобразует

электромагнитное поле $П_{11}$ и информационное поле $П_{12}$, регулирующее автоматическое включение и выключение двигателя, а также использует вещество $В_8$ в виде воздушных масс для обдува заготовки.

Экструдер подвергается воздействию теплового поля $П_{13}$, генерируемого электродвигателем $В_9$, на который воздействуют электромагнитное поле $П_{14}$ и информационное поле $П_{15}$, устанавливающее необходимую температуру расплавления филамент. Так же на экструдер воздействуют два механических поля $П_{16}$ и $П_{19}$ для совершения движения по осям Y и Z. Эти механические поля генерируют электродвигатели $В_{10}$ и $В_{11}$, в каждый из которых поступает электрическая энергия в виде электромагнитных полей $П_{17}$ и $П_{20}$. Так же каждый двигатель регулируется информационным полем $П_{18}$ и $П_{21}$ для регулирования расстояния передвижения головки экструдера по соответствующим осям.

Данная схема позволяет наглядно представить работу 3D-принтера и взаимодействие между его элементами. Однако проведённый вепольный анализ является сложным, а большое количество элементов и их взаимосвязей затрудняет выявление зон для улучшения качества печати.

Исходя из проведённого выше анализа QFD проблема повышения качества и точности 3D-печати является наиболее важной и актуальной. Существуют технические решения, позволяющие добиться повышения качества изготовления. Однако, многие из этих решений приводят к снижению скорости печати. Для данной задачи повышение качества и сохранение скорости печати будут являться техническим противоречием. Такой инструмент как ТРИЗ позволяет разрешать технические противоречия, а значит помогает найти решения для улучшения качества печати без потерь по времени.

Методика ТРИЗ содержит готовые идеи для разрешения наиболее часто встречающихся противоречий. Воспользуемся таблицей приёмов разрешения технических противоречий. Используем принцип под номером 28 – «принцип замены механической схемы, который предполагает использовать электрические, магнитные и электромагнитные поля для взаимодействия с объектом или использовать поля в сочетании с ферромагнитными частицами» [8].

Для реализации выделяем из полной схемы неполный веполь (рис. 4).

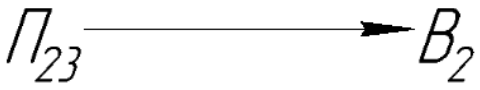


Рис. 4. Неполный веполь

Этот веполь отображает воздействие теплового поля экструдера на филамент. Данный веполь является неуправляемым, так как содержит всего два элемента. Попробуем использовать магнитное поле в сочетании с ферромагнитными частицами. Добавим в веполь новые элементы: $В_2'$ - ферромагнитные частицы и $П_{маг}$ - магнитное поле (рис. 5).

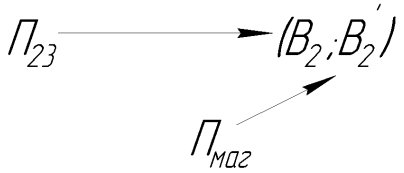


Рис. 5. Управляемый веполь

Магнитное поле в данном случае позволяет доформировать ещё незастывший пластик до нужной формы, уточняя и детализируя изделие. Ранее магнитное поле предлагали использовать для управления с помощью тока процессом кристаллизации жидкого токопроводящего материала в 3D-принтере [9]. Добавление ферромагнитного порошка и магнитного поля позволяет повысить детализацию изделия и его точность, обеспечить повышение скорости 3D-печати и уменьшить пористость материала готовой продукции. Эти действия позволяют удовлетворить требования потребителей. Однако, введение новых полей и веществ влечёт за собой появление новых рисков. Для выявления и предотвращения рисков необходимо провести FMEA-анализ.

Анализ видов и последствий потенциальных несоответствий конструкции (DFMEA). «DFMEA – метод, целью которого является улучшение конструкции на основе анализа потенциальных несоответствий конструкции с количественным анализом последствий и причин несоответствий» [10].

Выдвинутая с помощью ТРИЗ идея использования ферромагнитного порошка, является инновационной идеей для улучшения качества печати. Но данный метод решения изобретательских задач имеет некоторые ограничения, так как не рассматривает возможность возникновения потенциальных несоответствий при изменении конструкции 3D-принтера.

На базе существующей модели 3D-принтера, создается и рассматривается теоретическая модель нового 3D-принтера. Данная модель включает в себя источник магнитного поля, служащий для формирования незастывшего слоя, и образование новой структуры материала, посредством добавления ферромагнитного порошка. В связи с этим, выдвигается ряд потенциальных несоответствий, которые предстоит решить при создании данной модели 3D-принтера.

Преимуществом DFMEA является то, что при его применении значительно снижается количество изменений, вносимых на стадии производства, и многие ожидаемые несоответствия обнаруживаются и устраняются на этапе проектирования. Такой подход снижает уровень затрат на доработку и количество рекламаций и жалоб заинтересованных сторон [11].

Протокол DFMEA 3D-принтера представлен на рис. 6.

Данный протокол DFMEA включает в себя описание функции 3D-принтера: формирование слоев изделия посредством воздействия магнитного поля. С его помощью выделяются виды потенциальных отказов, анализируются их возможные причины возникновения и потенциальные последствия.

DFMEA 3D-принтера

Изделие: 3D-принтер Ответственный за разработку: *Инженер-конструктор* Дата: 10.01.2020

Предыдущий: 0 Следующий: 2 Номер DFMEA: 1

Модель, год: *3D-принтер LulzBot Mini, 2020* Ключевая дата: Рук-ль рабочей группы: *Директор по качеству*

Команда исполнителей: *Инженер-конструктор, инженер-метролог, материаловед, главный конструктор, менеджер по качеству*

Процесс Функция / Требования	Потенциальное несоответствие	Последствие потенциального несоответствия	Знач. S	Потенциальная причина или механизм несоответствия	Возн. O	Действующие меры по предотвращению	Действующие меры по обнаружению	Обн. D	RPN	Рекомендуемое действие	Ответственный и планируемая дата завершения	Результаты действий				
												Предпринятые действия и дата завершения	Новые баллы			
													S	O	D	RPN
1	2	3	4	5	6	7	8	9			12	13	14	15	16	17
Формирование слоев изделия посредством воздействия магнитного поля	Неправильная ориентация ферромагнитных частиц	Нарушение структуры изделия	**6**	Неправильный заряд частиц	3	Мер не предусмотрено	Измерение параметров готового изделия	9	162	Установить датчик, отслеживающий ориентацию частиц	Менеджер по качеству, главный конструктор; 20.02.2020	Установлен датчик, отслеживающий ориентацию частиц; 18.02.2020	6	3	2	36
	Неправильное воздействие магнитным полем	Смещение слоя	**8**	Неправильно настроено действие магнитного поля	6	Регламентация входных параметров электрического поля	Программа, прогнозирующая изменения формы материала под воздействием поля	7	336	Внедрение сверхчувствительных мультиметров	Менеджер по качеству, главный конструктор; 23.02.2020	Внедрены сверхчувствительные мультиметры; 25.02.2020	8	6	2	96
	Воздействие посторонних полей	Смещение магнитного поля	**8**	Расположение поблизости источников полей	9	Экранирование 3D-принтера	Использование магнитометра	5	360	Печать в отдельном помещении	Начальник цеха; 7.03.2020	Печать в отдельном помещении; 7.03.2020	8	3	5	120
	Изменение структуры материала за счет добавления в него ферромагнитных частиц	Увеличение/снижение пористости материала	**5**	Неправильно подобранное количество ферримагнитного порошка	5	Расчет количества вводимого порошка	Предварительный анализ материала с порошком	3	75	Автоматизация процесса добавления ферромагнитных частиц в порошок	Материаловед; 30.02.2020	Автоматизация процесса добавления ферромагнитных частиц в порошок; 27.02.2020	5	2	2	20
	ёИзменение заряда ферромагнитного порошка из-за воздействия температуры	Невозможность управлять процессом формирования изделия	**9**	Неправильно подобранная температура	7	Расчет необходимой температуры	Использование термометров для контроля температуры	3	126	Использование температурных шкал	Инженер-метролог; 18.02.2020	Использование температурных шкал; 18.02.2020	9	2	3	54

Рис. 6. QFD 3D-принтера LulzBot Mini

Затем рассчитывается приоритетное число риска RPN (Risk Priority Number), являющееся произведением ранга значимости последствий отказа (S), ранга частоты возникновения причины несоответствия (O) и ранга обнаружения потенциальной причины несоответствия (D). В рамках отдельного DFMEA-анализа значение RPN используется для ранжирования отказов, возникающих в конструкции: воздействие посторонних полей (360), неправильное воздействие магнитным полем (336), неправильная ориентация ферромагнитных частиц (162), изменение заряда ферромагнитного порошка из-за воздействия температуры (126) и изменение структуры материала за счет добавления в него ферромагнитных частиц (75).

Следующим этапом происходит формирование рекомендуемых действий для снижения ранга значимости, возникновения и обнаружения.

Оценка и запись полученных показателей значимости, возникновения и обнаружения для предложенного варианта конструкции необходимо проанализировать и посчитать значение нового результирующего RPN. По данным проведенного анализа RPN было снижено, и была сформулирована новая приоритетность отказов: воздействие посторонних полей (120), неправильное воздействие магнитным полем (96), изменение заряда ферромагнитного порошка из-за воздействия температуры (54), неправильная ориентация ферромагнитных частиц (36), и изменение структуры материала за счет добавления в него ферромагнитных частиц (20).

Данный анализ позволяет выявить потенциально опасные несоответствия, установить рекомендуемые действия, сформировать план испытаний для снижения RPN до допустимого значения, что снижает риск возникновения несоответствий у данной модели 3D-принтера.

Подробнее опишем анализируемую функцию формирования слоев изделия посредством воздействия магнитного поля.

После добавления новых элементов в конструкцию 3D-принтера скорость печати изделия измениться не должна. Формирование изделия так же происходит послойно, но в обновленной конструкции принтера на каждый незастывший слой расплавленной проволоки, содержащей ферромагнитные частицы, будет воздействовать магнитное поле. Путем воздействия магнитного поля происходит корректировка незастывшего слоя, что позволяет более точно формировать контур изготавливаемого изделия. Магнитное поле притягивает или отталкивает ферромагнитные частицы. Данная особенность позволит добиться лучшего качества поверхности изделия, а процесс охлаждения пластика, посредством обдува, позволяет не снижать скорость печати.

Графическое изображение процесса представлено на рис. 7. Жидкий пластик, содержащий феррочастицы, из сопла наносится на застывший слой материала. На частицы оказывает действие магнитное поля, формирующее край слоя. Потоком воздуха охлаждает материал и фиксирует его окончательное положение.

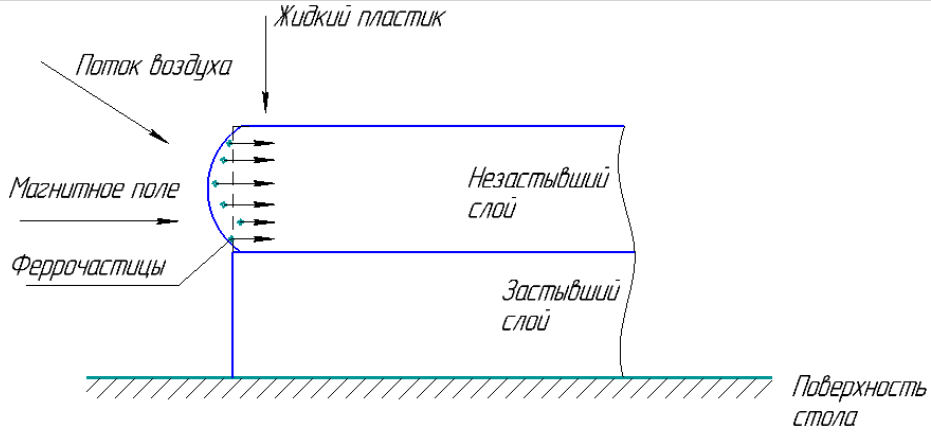


Рис. 7. Формирование слоев изделия посредством воздействия магнитного поля

Выводы

В работе продемонстрирована возможность применения совокупности инструментов инжиниринга качества QFD, ТРИЗ и FMEA в целях проектирования качества и совершенствования конструкции 3D-принтера. С помощью QFD первого уровня было выявлено, что время изготовления и разрешение печати являются наиболее приоритетными показателями качества, обладающими относительным весом 17,8 и 14,2% соответственно.

В результате использования ТРИЗ была предложена концепция решения поставленной задачи, позволяющая повысить точность создаваемых на 3D-принтере изделий и избежать потерь по продолжительности изготовления. В данном случае противоречием явилась сложность повышения качества и точности изделия без ухудшения характеристик времени. Добавление ферромагнитных частиц в сочетании с магнитным полем является распространенным приемом, позволяющим разрешить многие технические противоречия. Методика ТРИЗ применима на любом этапе проектирования и помогает добиться наилучших результатов, не ухудшая производительность и в то же время улучшая качество изделия или процесса.

Завершающим этапом является применение DFMEA, с помощью которого были выявлены потенциальные несоответствия, которые могут возникнуть при изменении конструкции 3D-принтера. Кроме того, для каждого несоответствия было рассчитано приоритетное число риска (RPN), позволяющее учесть вероятность возникновения несоответствия. Предложенные меры по снижению риска возникновения потенциальных несоответствий, вызванных изменением конструкции 3D-принтера, позволили уменьшить RPN в среднем больше, чем на 50%.

Таким образом, использование совокупности инструментов QFD, ТРИЗ и FMEA позволяет учесть самые разнообразные аспекты, влияющие на качество, усовершенствовать продукт и повысить его конкурентоспособность путем нахождения инновационных путей решения проблемы отрицательной корреляции, а также учесть и снизить риск возникновения потенциальных несоответствий, связанных с изменением конструкции 3D-принтера.

Список литературы

1. Дресвянников В.А., Бунимович И.Д. Состояние и перспективы использования аддитивных технологий для производства товаров потребительского назначения // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Экономические науки. 2017. №2 (6). С. 35-43.

2. McCue TJ. Significant 3D Printing Forecast Surges To $35.6 Billion [Электронный ресурс]. URL: https://www.forbes.com/sites/tjmccue/2019/ 03/ 27/ wohlers-report-2019-forecasts-35-6-billion-in-3d-printing-industry-growth-by-2024/#6965c6827d8a (дата обращения: 20.03.2020).

3. Дмитриев А.Я., Филиппова Т.С. Инжиниринг качества беспилотного летательного аппарата на основе метода QFD // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 12. С. 74-77.

4. 3d-принтер // Mplast.by: информационно-аналитический портал о полимерной индустрии и химической промышленности, 2017. [Электронный ресурс] URL: https://mplast.by/encyklopedia/3d-printer/ (дата обращения: 15.03.2020).

5. Дмитриев А.Я., Митрошкина Т.А., Вашуков Ю.А. Развёртывание функции качества (QFD). Самара: Изд-во СГАУ. 2009. 54 с.

6. Alahmari F., Arevalo S., Evans B., Garcia T., Gouveia B., Work J. Next Generation 3D Printer [Электронный ресурс]. URL: https:// www.cefns.nau.edu/capstone/projects/ME/2016/Advanced3DPrintingTechniques/images/Novakinetics%20Problem%20Definition.pdf (дата обращения: 27.03.2020).

7. Петров В.М. Структурный анализ систем. Вепольный анализ. ТРИЗ. М.: Издательские решения, 2018. 230 с.

8. Альтшуллер Г.С. Алгоритм изобретения. М.: Московский рабочий. 1973. Приложение 1. С. 141-165.

9. Патент 2706270C1 Российская Федерация. Способ изготовления изделий из жидкого токопроводящего материала в 3D-принтере / Мандель А.М., Ошурко В.Б., Шарц А.А.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» № 2018122650; заявл. 2018.06.21; опубл. 2019.11.15.

10. Дмитриев А.Я., Вашуков Ю.А., Митрошкина Т.А. Робастное проектирование и технологическая подготовка производства изделий авиационной техники: учебное пособие. Самара: Изд-во СГАУ, 2016. 76 с.

11. Русских И.В. Оценка риска процесса наладки экструзионной линии // Материалы VIII международного научно-практического форума «Эффективные системы менеджмента: качество и цифровая трансформация». 2019. Ч. 1. С. 223-228.

Ермилина Дарья Владиславовна, студент, dar.yermilina@gmail.com, Россия, Самара, Самарский университет,

Казандаева Софья Николаевна, студент, marusia9629@gmail.com, Россия, Самара, Самарский университет,

Сергиенко Анастасия Олеговна, студент, anastasiia.sierghiienko.00@mail.ru, Россия, Самара, Самарский университет,

Русских Ирина Вячеславовна, аспирант, russkih56irina@mail.ru, Россия, Самара, Самарский университет

QUALITY ENGINEERING OF 3D PRINTER CONCEPTUAL DESIGN

D.V. Yermilina, S.N. Kazandaeva, A.O. Sergienko

The article suggests the use of the combination of quality engineering methods QFD, TRIZ and FMEA for the conceptual design of a 3D printer with higher accuracy and saving production time. Such an integrated approach involves a comprehensive review of the printer design process and the synergistic effect of the application of the suggested set of methods.

Key words: 3D printer, additive manufacturing, layer-by-layer building-up, quality engineering, QFD, TRIZ, FMEA, design.

Yermilina Daria Vladislavovna, student, dar.yermilina@gmail.com, Russia, Samara, Samara University,

Kazandaeva Sofya Nikolaevna, student, marusia9629@gmail.com, Russia, Samara, Samara University,

Sergienko Anastasia Olegovna, student, anastasiia.sierghiienko.00@mail.ru, Russia, Samara, Samara University,

Russkih Irina Vyacheslavovna, postgraduate, russkih56irina@mail.ru, Russia, Samara, Samara University

УДК 658.562

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В ДОРОЖНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

О.И. Борискин, Г.А. Нуждин, И.В. Муравьева, С.А. Богомолова

Обсуждены вопросы исполнения требований Технического регламента Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог» (ТР ТС 014/2011) при осуществлении оценки соответствия автомобильных дорог и процессов их проектирования, строительства, реконструкции, капитального ремонта и эксплуатации. Определены элементы и процессы метрологического обеспечения измерений, испытаний и контроля применительно к дорожному хозяйству. Подтверждена особая актуальность и необходимость разработки основополагающего отраслевого дорожного методического документа в целях обеспечения системного подхода к метрологической деятельности в дорожном хозяйстве.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, дорожное хозяйство, дорожно-строительные материалы, средство измерений, испытательное оборудование.

При осуществлении оценки соответствия автомобильных дорог и процессов их проектирования, строительства, реконструкции, капитального ремонта и эксплуатации требованиям Технического регламента

Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог» (ТР ТС 014/2011) необходимо использовать достоверную измерительную информацию о значениях параметров качества автомобильных дорог, дорожных сооружений на различных этапах их жизненного цикла, дорожно-строительных материалов и изделий. С целью получения измерительной информации с заданными свойствами осуществляют разработку и поддержание эффективного функционирования метрологического обеспечения измерений, испытаний и контроля в дорожном хозяйстве. Основные положения метрологического обеспечения измерений, испытаний и контроля применительно к различным областям деятельности установлены в ГОСТ Р 8.820-2013 «ГСИ. Метрологическое обеспечение. Основные положения» [1]. В соответствии с [1] метрологическое обеспечение измерений, испытаний и контроля объекта представляет собой совокупность взаимосвязанных элементов (средства измерений, стандартные образцы, эталоны, поверочные и калибровочные установки и др.) и процессов (проектирование и подтверждение пригодности элементов метрологического обеспечения) и основано на системном подходе к измерениям, испытаниям и контролю.

В настоящее время действует ряд стандартов, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и измерений, в том числе правила отбора образцов, необходимые для применения и исполнения требований технического регламента Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог» (ТР ТС 014/2011) и осуществления оценки (подтверждения) соответствия продукции [2]. Однако отсутствует системный подход к метрологическому обеспечению ввиду отсутствия или неоднозначно сформулированных требований к элементам и процессам метрологического обеспечения. В некоторых случаях отсутствуют утвержденные методики подтверждения пригодности испытательного оборудования и средств измерительной техники, схемы прослеживаемости при передаче единицы величины от эталона к средствам измерений.

Поэтому были поставлены задачи по определению элементов и процессов метрологического обеспечения измерений, испытаний и контроля применительно к дорожному хозяйству.

Принятие решений о соответствии автомобильных дорог требованиям технического регламента, документов по стандартизации основано на использовании измерительной информации о численных значениях измеряемого технического параметра (величины). Важным свойством измерительной информации является достоверность - свойство измерительной информации быть правильно воспринятой и однозначно интерпретированной для принятия управляющих решений.

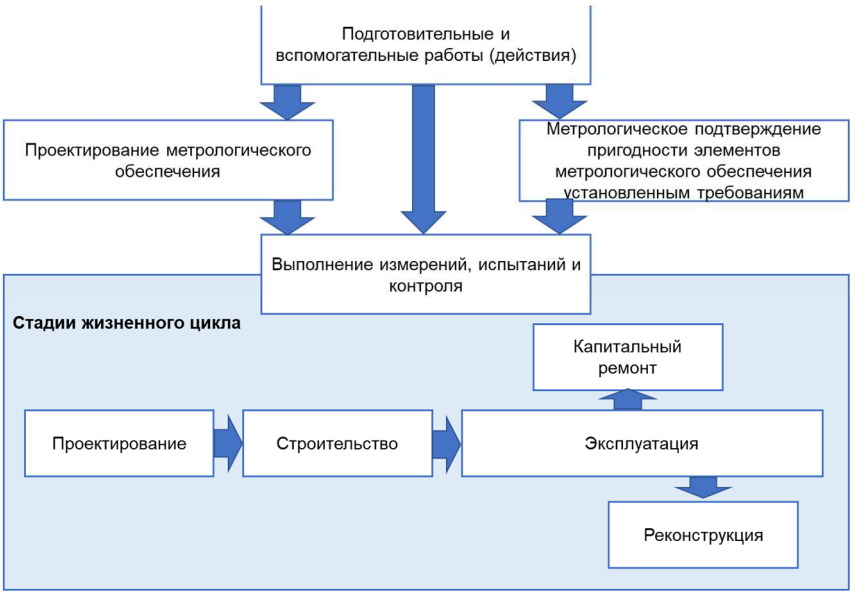
В целях получения достоверных и сопоставимых результатов измерений технических параметров автомобильных дорог (независимо от времени и места выполнения измерений) осуществляют комплекс мероприятий по обеспечению единства измерений. Обеспечение единства измерений является главной задачей метрологического обеспечения измерений в дорожном хозяйстве. Под метрологическим обеспечением дорожного хо-

зяйства понимают систематизированный набор средств и методов, направленных на получение достоверной информации о показателях качества автомобильных дорог на стадиях проектирования, строительства, реконструкции, капитального ремонта и эксплуатации, которая может быть использована для выработки решений по приведению автомобильных дорог в целевое состояние.

В частности, технические требования к автомобильным дорогам, дорожным сооружениям, дорожно-строительным материалам и изделиям, а также требования законодательства в области обеспечения единства измерений [3-5], служат основанием для формулирования требований к элементам и процессам метрологического обеспечения измерений, испытаний и контроля в дорожном хозяйстве.

В целях соблюдения требований ТР ТС 014/2011 [2] применяют стандартизованные методы исследований (испытаний) и измерений, включенные в Перечень стандартов, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и измерений, в том числе правила отбора образцов, необходимые для применения и исполнения требований технического регламента Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог» (ТР ТС 014/2011) и осуществления оценки (подтверждения) соответствия продукции [6] и обеспечивающие получение результатов измерений с установленными показателями точности.

Взаимосвязь между процессами метрологического обеспечения применительно к дорожному хозяйству изображена на рисунке.



Взаимосвязь между процессами метрологического обеспечения применительно к дорожному хозяйству

На основании результатов анализа действующих документов по стандартизации и нормативно-методических документов ГСИ был сформирован перечень документов, рекомендуемых для включения в систему метрологического обеспечения дорожного хозяйства (табл. 1).

Таблица 1

Документы по стандартизации и нормативно-методические документы Государственной системы обеспечения единства измерений, применяемые в дорожном хозяйстве

Обозначение стандарта	Наименование стандарта
ГОСТ Р 8.000 [7]	ГСИ. Основные положения
ГОСТ Р 8.820 [1]	ГСИ Метрологическое обеспечение. Основные положения
ГОСТ 8.417 [8]	ГСИ. Единицы величин
ГОСТ Р 8.885 [9]	ГСИ. Эталоны. Основные положения
ГОСТ Р 8.674 [10]	ГСИ. Общие требования к средствам измерений и техническим системам и устройствам с измерительными функциями
ГОСТ 8.009 [11]	Нормируемые метрологические характеристики средств измерений
ГОСТ 8.401 [12]	ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования.
ГОСТ Р 8.563 [13]	ГСИ. Методики (методы) измерений
ГОСТ Р 8.753 [14]	ГСИ. Стандартные образцы материалов (веществ). Основные положения
ГОСТ 8.315 [15]	ГСИ. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Основные положения
ГОСТ Р 8.568 [16]	ГСИ. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения
ГОСТ 34100.1 [17]	Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководства по выражению неопределенности измерения
ГОСТ 34100.3 [18]	Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения
ГОСТ Р ИСО 5725 [19]	Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений (6 частей)
ГОСТ Р 8.731 [20]	ГСИ. Системы допускового контроля. Основные положения
ГОСТ Р 8.892 [21]	Метрологическое обеспечение. Анализ состояния на предприятии, в организации, объединении
ПР 50.2.016 [22]	ГСИ. Российская система калибровки. Требования к выполнению калибровочных работ
МИ 1317 [23]	ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров
РМГ 63 [24]	ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации
РМГ 29 [25]	ГСИ. Метрология. Основные термины и определения

В рамках разработки проекта отраслевого дорожного методического документа систематизируются особенности применения законодательных основ при выполнении измерений, испытаний и контроля в дорожном хозяйстве. Применение такого методического документа обеспечит системный подход к метрологической деятельности в дорожном хозяйстве за счет описания элементов (средств измерений, стандартных образцах, эталонов и др.), процессов (проектирование и подтверждение пригодности элементов метрологического обеспечения), что будет способствовать получению результатов измерений с установленными показателями точности (правильности, сходимости и воспроизводимости).

Кроме этого, положения такого документа разъяснят особенности применения законодательных основ при осуществлении метрологической деятельности различными участниками отрасли (проектными, строительными организациями, производителями, испытательными лабораториями и организациями, осуществляющими строительный контроль), пояснят их права и полномочия при выполнении измерений, испытаний и контроля в дорожном хозяйстве. Внедрение и применение такого документа, в конеч-

ном счете, повысит достоверность измерительной информации о состоянии объектов дорожного хозяйства. В табл. 2 приведена часть из этого проекта.

Таблица 2

Перечень средств измерений и испытательного оборудования для определения технических характеристик дорожно-строительных материалов в соответствии с ТР ТС 014/2011 [2], а также грунтов, асфальтобетона, асфальтобетонных смесей и нефтяных вяжущих в соответствии с действующими документами национальной системы стандартизации

Песок природный (дробленый)			
Номер	Наименование оборудования	Метрологические требования	Примечание
1	Весы электронные	Наибольший предел взвешивания не менее 6000 г; цена деления не более 1 г	
2	**Сита лабораторные ISO 3310-1**	**Ячейки должны иметь квадратную форму и размеры: 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8 мм**	
3	Сушильный шкаф	Должен обеспечивать поддержание температуры в интервале (110 ± 5) ºС	
4	Весы электронные	Наибольший предел взвешивания не менее 2000 г; цена деления не более 0,1 г	
5	Цилиндры мерные	Объем 30 или 50 $см^3$	
6	Лупа минералогическая по ГОСТ 25707		
7	Радиометрическая установка		*
8	Фотоколориметр или спектрофотометр	Спектральным диапазон от 350 до 650 нм; предел измерения оптической плотности не менее 0,68	Д
9	Линейка металлическая по ГОСТ 427	-	Д
10	Сосуд металлический цилиндрической формы	Номинальный объем составляет (1 ± 0,05) $дм^3$	Д
11	**Установка для определения эквивалента песка**		**Д**
Щебень и гравий из горных плотных пород; Щебень и песок шлаковые			
12	Сушильный шкаф	Должен обеспечивать поддержание температуры в интервале (110 ± 5) ºС	
13	Шаблон передвижной или штангенциркуль по ГОСТ 166		
14	**Сита лабораторные по ISO 3310-2 или по ISO 3310-1**	**Размеры ячеек: 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 1,6; 4; 5,6; 8; 11,2; 14; 16; 22,4; 31,5; 45; 63; 90; 125 мм**	
15	Весы электронные	Наибольший предел взвешивания не менее 20000 г; цена деления не более 5 г	
16	Весы электронные	Наибольший предел взвешивания не менее 1000 г; цена деления не более 0,1 г	
17	Термометр	Цена деления не более 1 °С (диапазон измерений - от 10 °С до 30°С)	
18	Пресс гидравлический	Максимальное усилие не менее 200 кН	
19	Цилиндры стальные, оснащенные съемным дном и плунжером	Внутренние диаметры цилиндров - (75 ± 1) мм, (150 ± 2) мм; высота цилиндров (75 ± 1) мм и (150 ± 2) мм соответственно	
20	Испытательная машина Лос-Анджелес в комплекте со стальными шарами	Скорость вращения барабана при испытаниях должна составлять от 30 до 33 об/мин; внутренние размеры: длина - (497 ± 16) мм, диаметр - (708 ± 8) мм	

Продолжение таблицы 2

Номер	Наименование оборудования	Метрологические требования	Примечание
21	Фотоколориметр или спектрофотометр	Спектральным диапазон от 350 до 650 нм; предел измерения оптической плотности не менее 0,68	Д
22	**Испытательная установка микро – Деваль**	**Скорость их вращения барабанов вокруг горизонтальных осей (100 ± 5) об/мин. Толщина стенки барабанов должна быть не менее 3 мм, внутренний диаметр - (200 ± 1) мм, длина - (154±1) мм. Барабаны должны быть оснащены плоскими крышками толщиной не менее 8 мм с уплотнителями, обеспечивающими водонепроницаемость и пыленепроницаемость; комплект стальных шаров диаметром (10,0 ± 0,5) мм**	Д
23	Радиометрическая установка		*
		Минеральный порошок	
24	Сушильный шкаф	Должен обеспечивать поддержание температуры в интервале (110 ± 5) ºС	
25	**Сита лабораторные ISO 3310**	**Размеры ячеек: 0,063; 0,125; 2,0 мм**	
26	Весы электронные	Наибольший предел взвешивания не менее 2000 г; цена деления не более 0,01 г	
27	Пресс гидравлический или механический по ГОСТ 28840	Максимальное усилие не менее 100 кН	
28	Форма для уплотнения минерального порошка	Объём 100 $см^3$	
29	Прибор Вика по ГОСТ 310.3	Масса груза (170,0±0,5) г; Цена деления 1 мм; Диапазон измерения от 0 до 40 мм	
30	Радиометрическая установка		*
		Битумы	
31	Пенетрометр по ГОСТ 1440 и иглы пенетрационные	Масса Плунжера с иглой 50 г; Массы грузов 50 и 150 г	
32	Термостат	С возможностью установления и поддержания температур 0 ºС и 25 ºС с погрешностью не более 0,1 ºС	
33	Сито по ГОСТ 6613	С размером ячеек 0,7 мм	
34	Аппарат, для определения температуры размягчения битума (КИШ)	Масса шарика (3,5±0,05) г Внутренний диаметр колец 15,9 мм Диаметр шарика (9,5±0,05) г Конструкция в соответствии с ГОСТ 33142	
35	Секундомер	Диапазон измерения 0 … 60 с цена деления не более 0,2 с	
36	Термометры	Диапазон измерения от -5ºС до 55ºС и от 55ºС до 110 ºС; цена деления не более 0,5ºС	
37	Аппарат Фрааса	Ручной или автоматический С требованиями по ГОСТ 33143	
38	Дуктилометр с формами для растяжения битумных образцов	Скорость перемещения каретки 5 см/мин; Диапазон перемещения не менее 1000 мм	**Дополнительно датчик определения усилий при растяжении**
39	Термометр ртутный стеклянный с длиной погружаемой части (255 ± 5) мм, диаметром не более (6,0 ± 0,5) мм	Диапазон измерения от -38 °С до 30 °С; Цена деления не более 0,5 °С	
40	Весы электронные	Наибольший предел взвешивания не менее 1000 г; Цена деления не более 0,01 г	

Продолжение таблицы 2

Номер	Наименование оборудования	Метрологические требования	Примечание
41	Аппарат для определения температуры вспышки в открытом тигле	Требования к конструкции в соответствии с ГОСТ 33141	
42	Термометр ртутный стержневой	Диапазон измерения от 0 °С до 60 °С, Цена деления 1 °С	
43	Шкаф сушильный, обеспечивающий нагрев до 200°С		
44	Весы по ГОСТ 24104	Наибольший предел взвешивания не менее 200 г; Цена деления не более 0,002 г	
45	Колба Эрленмейера с пробкой из пробкового дерева	Объем 100 $см^3$	
46	Чашки петри	Диаметр (80 ± 1) мм; Высота (15 ± 1) мм	
47	Весы по ГОСТ 24104	Наибольший предел взвешивания не менее 50 г. Цена деления не более 0,0002 г	
48	**Печь для старения битума по методу RTFOT**	**Требования к конструкции в соответствии с ГОСТ 33141**	
49	**Ротационный вискозиметр**	**Для определения динамической вязкости в соответствии с ГОСТ 33137**	Д
Цемент (для дорожного строительства)			
50	Сито по ГОСТ 6613	Размер ячеек 0,08 мм	
51	Виброгрохот		
52	Прибор Вика	Масса груза (170,0±0,5) г; Цена деления 1 мм; Диапазон измерения 0 … 40 мм	
53	Весы электронные	Цена деления не более 0,01 г	
54	Цилиндр мерный по ГОСТ 1770	Цена деления не более 1 мл	
55	Кольца Ле Шателье		
56	Бачок для кипячения		
57	Штангенциркуль по ГОСТ 166	С ценой деления 0,1 мм или 0,05 мм	
58	Пресс	С максимальным усилием до 100 кН	
59	Формы для испытаний на сжатие и растяжение при изгибе		
60	Формы для балочек	Размеры рабочей полости, мм 40×40×160	
61	Цилиндр измерительный по ГОСТ 1770	Объем 500 $см^3$	
62	Встряхивающий столик	Автоматический, для изготовления образцов	
Грунты (как дсм в ТР ТС не входят)			
63	Шкаф сушильный, обеспечивающий нагрев до 100°С		
64	Режущие кольца	Объемы 200 и 400 куб см	
65	Прибор стандартного уплотнения	Масса груза 3000 г; Высота падения 300 мм; Диаметр формы 100 мм	
66	Прибор для определения коэффициента фильтрации	Масса груза 500 г; Высота падения 300 мм; Диаметр формы 50 мм	
67	Набор сит для грунтов	10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2; 0,1 мм	
68	Конус балансирный Васильева	Масса конуса 76 г	
69	Весы электронные	Цена деления не более 0,01 г	
70	Весы электронные	Цена деления не более 1 г	

Продолжение таблицы 2

Асфальтобетон (ПНСТ 183 и ПНСТ 184)			
Номер	Наименование оборудования	Метрологические требования	Примечание
71	**Уплотнитель Маршала и формы для изготовления образцов**		
72	Весы с гидростатическим взвешиванием	Цена деления 0,1 г	
73	Шкаф сушильный, обеспечивающий нагрев до 180°С		
74	**Вибрационное устройство**	**Для проведения испытаний по ПНСТ 92**	
75	**Вакуумная установка**	**Для проведения испытаний по ПНСТ 92**	
76	Термометр	С ценой деления 0,1 °С (19 … 27)	
77	Термостат	Возможность создавать и поддерживать температуру 60 °С	
78	Пресс 50 кН	Скорость деформации 50 мм/мин	
79	**Нагрузочные пластины**	**Чертеж по ПНСТ 113. Определение водостойкости**	
80	Морозильная камера	С возможностью установления и поддержания температур в диапазоне от -15°С до -21°С	
81	**Обжимное устройство**	**Чертеж по ПНСТ 109. Определение деформации и разрушающей нагрузки**	
82	**Испытательная установка для определения колееобразования**	**ПНСТ 181**	
83	**Вальцовый уплотнитель для асфальтобетона**	**ПНСТ 185**	
84	Печь муфельная либо аппарат для экстрагирования		
85	**Сита лабораторные по ISO 3310**	**0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 5,6; 8; 11,2; 16; 22,4; 31,5; 45**	
86	Пресс 50 кН	Скорость деформации 10 мм/мин	Д
87	**Опорное устройство и стержень**	**ПНСТ 179**	Д
88	**Установка для определения истираемости асфальтобетона (в комплекте с стальными шарами)**	**ПНСТ 180**	Д
89	Криостат	Возможность создавать и поддерживать температуру 5 °С	Д
90	Вакуумная установка	2000 Па	
91	Стаканы термостойкие 1 л		
Асфальтобетон (ПНСТ 114 и ПНСТ 127)			
92	**Вращательный уплотнитель (Гиратор)**	**Давление 600 Па; Угол 1,16 град. 30 оборотов/мин**	
93	**Сита лабораторные**	**0,075; 1,18; 2,36; 4,75; 9,5; 12,5; 19; 25; 37,5;**	
94	Весы с гидростатическим взвешиванием	Цена деления 0,1 г	
95	Шкаф сушильный, обеспечивающий нагрев до 180°С		
96	**Вибрационное устройство**	**Для проведения испытаний по ПНСТ 92**	

Окончание таблицы 2

Номер	Наименование оборудования	Метрологические требования	Примечание
97	**Вакуумная установка**	**Для проведения испытаний по ПНСТ 92**	
98	Термостат	Возможность создавать и поддерживать температуру 60 °С	
99	Пресс 50 кН	Скорость деформации 50 мм/мин	
100	**Нагрузочные пластины**	**Чертеж по ПНСТ 113**	
101	Морозильная камера	С возможностью установления и поддержания температур в диапазоне от -15°С до -21°С	
102	Термостат	Возможность создавать и поддерживать температуру 60 °С	
103	**Набор для определения эквивалента песка**	**Конструкция представлена в ГОСТ 33052**	Минеральные материалы
104	**Набор для определения плотности минерального заполнителя**	**Конструкция представлена в ПНСТ 71, 78 и 77**	
105	**Набор для определения объема пустот мелкозернистых материалов**	**Конструкция представлена в ПНСТ 73**	
106	Шаблон для определения лещадности		
Битум ПНСТ 82			
107	Аппарат для определения температуры вспышки в открытом тигле	Требования к конструкции в соответствии с ГОСТ 33141	
108	**Ротационный вискозиметр**	**Для определения динамической вязкости в соответствии с ГОСТ 33137**	
109	**Динамический сдвиговой реометр DSR**	**ПНСТ 88**	
110	**Печь для старения битума по методу RTFOT**	**Требования к конструкции в соответствии с ГОСТ 33141**	Состаренные по методу RTFOT
111	**Динамический сдвиговой реометр DSR**	**ПНСТ 88**	
112	**Камера высокого давления PAV**	**2,1 МПа; Воспроизведение и поддержание температуры в диапазоне от 90 °С до 110°С**	Состаренные по методу PAV
113	**Вакуумная печь**	**15 кПа; 170 °С**	
114	Весы электронные	Цена деления 0,5 г	
115	**Динамический сдвиговой реометр DSR**	**ПНСТ 87**	
116	Шкаф сушильный, обеспечивающий нагрев до 180°С	Точность поддержания 1°С	
117	**Реометр, изгибающий балочку BBR или Динамический сдвиговой реометр DSR**	**ПНСТ 79. Испытание может быть заменено на ПНСТ 89**	
118	**Устройство для растрескивания вяжущего ABCD**	**Схема и требования представлены в ПНСТ 83; Испытание может быть заменено на ПНСТ 79 или ПНСТ 89**	

К табл. 2 существуют следующие примечания:

1. Полужирным шрифтом отмечено новое оборудование, которое впервые стало применяться в дорожной отрасли в связи с введением в действие ТР ТС 014/2011, а также гармонизированных с ним национальных и

предварительных национальных стандартов на асфальтобетон, минеральные материалы и битумные вяжущие (такие как ПНСТ 183, ПНСТ 184, ПНСТ 82, ПНСТ 114, ПНСТ 127 и др., которые в ближайшее время будут переработаны в национальные стандарты);

2. Д - показатель, определяемый с применением данного оборудования – дополнительный;

3. Этот список является максимальным для оснащения организаций, осуществляющих проектирование асфальтобетонных смесей и исследование дорожно-строительных материалов. Список оборудования для подрядчика и заказчика может быть минимальным без установки колееобразования и секторного уплотнителя, при условии привлечения инжиниринговых центров.

4. Для проектирования и испытаний асфальтобетонов возможно применение оборудования по ПНСТ 183 и 184, либо оборудование по Системе Суперпейв (ПНСТ 114 и ПНСТ 127). Регион самостоятельно выбирает ту или иную систему проектирования исходя из его технико-экономических условий

Таким образом, определены элементы и процессы метрологического обеспечения измерений, испытаний и контроля применительно к дорожному хозяйству. Описаны основные элементы метрологического обеспечения – эталоны единиц величин и шкалы величин, установки (калибровочные, поверочные), средства измерений и стандартные образцы, методики (метода) измерений, операторы и условия измерений. Процессы метрологического обеспечения находятся в тесной взаимосвязи с элементами метрологического обеспечения. Применительно к дорожному хозяйству выделены следующие процессы метрологического обеспечения: проектирование метрологического обеспечения, метрологическое подтверждение пригодности элементов метрологического обеспечения установленным требованиям, подготовительные и вспомогательные работы (действия), связанные с проектированием метрологического обеспечения измерений, метрологическим подтверждением пригодности элементов метрологического обеспечения измерений и поддержанием функционирования системы метрологического обеспечения измерений.

Список литературы

1. ГОСТ Р 8.820-2013 ГСИ. Метрологическое обеспечение. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019.

2. Технический регламент Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог» (ТР ТС 014/2011), 2011.

3. Федеральный закон от 26.06.2008 N 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений», 2008.

4. Борискин О.И., Нуждин Г.А., Муравьева И.В. Идентификация черных металлов и сплавов с помощью рентгеновского анализатора Mobile X-50. // Черные металлы. 2020. № 3. С. 37 – 41.

5. Boriskin O.I., Nuzhdin G.A., Khunuzidi E.I., Blagoveshchenskiy D.I. The conformity assessment of metamaterials quality management // CIS Iron and Steel Review. 2019. Vol.17. P. 53 – 57.

6. Решение Коллегии ЕЭК от 18.09.2012 N 159 «О Перечне стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований технического регламента Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог» (ТР ТС 014/2011), Перечне стандартов, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и измерений, в том числе правила отбора образцов, необходимые для применения и исполнения требований технического регламента Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог» (ТР ТС 014/2011) и осуществления оценки соответствия объектов технического регулирования».

7. ГОСТ Р 8.000-2015. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019.

8. ГОСТ 8.417-2002. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Единицы величин. М.: Стандартинформ, 2018.

9. ГОСТ Р 8.885-2015. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Эталоны. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019.

10. ГОСТ Р 8.674-2009. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Общие требования к средствам измерений и техническим системам и устройствам с измерительными функциями. М.: Стандартинформ, 2019.

11. ГОСТ 8.009-84. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. М.: Стандартинформ, 2006.

12. ГОСТ 8.401-80. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Классы точности средств измерений. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2010.

13. ГОСТ Р 8.563-2009. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Методики (методы) измерений. М.: Стандартинформ, 2019.

14. ГОСТ Р 8.753-2011. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Стандартные образцы материалов (веществ). Основные положения измерений. М.: Стандартинформ, 2019.

15. ГОСТ 8.315-97. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2010.

16. ГОСТ Р 8.568-2017. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Аттестация испытательного оборудования. Основные положения измерений. М.: Стандартинформ, 2019.

17. ГОСТ 34100.1. Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководства по выражению неопределенности измерения. М.: Стандартинформ, 2018.

18. ГОСТ 34100.3. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. М.: Стандартинформ, 2018.

19. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения. М.: Стандартинформ, 2009.

20. ГОСТ Р 8.731-2010. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Системы допускового контроля. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019.

21. ГОСТ Р 8.892-2015. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Метрологическое обеспечение. Анализ состояния на предприятии, в организации, объединении. М.: Стандартинформ, 2019.

22. ПР 50.2.016-94. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Российская система калибровки. Требования к выполнению калибровочных работ. М.: Госстандарт России, 1995.

23. МИ 1317-2004. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров. М.: ФГУП ВНИИМС, 2004.

24. РМГ 63-2003. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004.

25. РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Метрология. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ, 2014.

Борискин Олег Игоревич, д-р техн. наук, профессор, директор ПТИ, заведующий кафедрой, polyteh2010@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Нуждин Георгий Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника отдела, nuzhdin.65@mail.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,

Муравьева Ирина Валентиновна, канд. техн. наук, доцент, iravm@bk.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,

Богомолова Светлана Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, s_bogomolova@mail.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

THE ROAD ECONOMY METROLOGICAL SUPPORT

O.I. Boriskin, G.A. Nuzhdin, I.V. Murav'eva, S.A. Bogomolova

Issues of compliance with the requirements of the Technical Regulation of the Customs Union "Road Safety" were discussed when assessing the conformity of roads and their design, construction, reconstruction, major repairs and operation processes. Elements and processes of metrological support of measurements, operations and control related to road economy are defined. The special relevance and necessity of developing a fundamental sectoral road methodological document in order to ensure a systematic approach to metrological activity in the road economy has been confirmed.

Key words: metrological support, road economy, road-building materials, measuring instrument, test equipment.

Boriskin Oleg Igorevich, doctor of technical sciences, professor, director of polytechnical institute, head of chair, polyteh2010@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Nuzhdin Georgy Anatolyevich, candidate of technical sciences, docent, deputy head of department, nuzhdin.65@mail.ru, Russia, Moscow, National Research Technological University «MISiS»,

Murav'eva Irina Valentinovna, candidate of technical sciences, docent, iravm@bk.ru, Russia, Moscow, National Research Technological University «MISiS»,

Bogomolova Svetlana Anatolyevna, candidate of technical sciences, docent of chair, s_bogomolova@mail.ru, Russia, Moscow, National Research Technological University «MISiS»

УДК 621.317

ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ РЕМОНТА ТЕХНИКИ СВЯЗИ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

М.Н. Плут, К.С. Чубарев, А.В. Мякотин, С.П. Кривцов, А.Н. Суслов

В данной статье для оценки эффективности системы ремонта техники связи и автоматизированных систем управления в качестве основных критериев ее качества предложены следующие показатели: оперативности и полноты, продолжительность управления.

Ключевые слова: система технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления, система ремонта, техника связи и автоматизированные системы управления, показатель оперативности, показатель полноты, этапы ремонта, метод сетевого планирования и управления.

Система ремонта, являясь подсистемой иерархической системы технического обеспечения связи и автоматизированных (ТОС и АСУ), в своей структуре отражает все необходимые признаки систем подобного класса. Следовательно, исследование данной системы целесообразно осуществлять с позиции учета составляющих ее подсистем. В качестве основных элементов, в ее структуре можно выделить следующие этапы:

управление процессом ремонта ТС и АСУ;

диагностирование (оценка состояния) ТС и АСУ;

ремонт ТС и АСУ;

обеспечение техники безопасности (ТБ) личного состава в ходе проведения ремонта ТС и АСУ.

Для оценки качества ремонта ТС и АСУ необходим набор соответствующих критериев, отражающих предъявляемые требования к исследуемому процессу и его результатам [1].

Такими критериями могут быть, в первую очередь, показатели оперативности и полноты.

Под оперативностью процесса ремонта ТС и АСУ будем понимать способность ремонтных органов выполнять необходимые работы в заданные сроки. Из данного определения следует, что показатель оперативности ремонта должен быть связан с длительностью составляющих его основных работ (операций). Тогда в качестве такого показателя можно принять время, реально затрачиваемое на ремонт ТС и АСУ.

Известно, что определение затрат времени на операции, технологически увязанных в единый процесс, удобно выполнять на основе метода сетевого планирования и управления (МСПУ) [2]. При этом в зависимости от целей анализа и характера исследуемого процесса, сетевая модель разрабатывается с различной степенью детализации.

Так, для планирования этапа ремонта ТС и АСУ математическая модель оценки оперативности может быть представлена в следующем виде:

$$T_{\text{пл}}^{\text{р}} = \sum_{j=1}^{3} t_{\text{пр}i} + t_{\text{оф}} + t_{\text{дов}} , \qquad (1)$$

где $t_{\text{пр1}}$ – время принятия информационного решения; $t_{\text{пр2}}$ – время принятия организационного решения; $t_{\text{пр3}}$ – время принятия оперативного решения; $t_{\text{оф}}$ – время оформления документов планирования ремонта ТС и АСУ; $t_{\text{дов}}$ – время доведения распоряжений до подчиненных ремонтных органов.

Для оперативного управления процессом ремонта ТС и АСУ, который, как правило, организуется на основе ситуационного принципа и по своему характеру отличается от планирования, выражение (1) принимает вид:

$$T_{\text{оу}}^{\text{р}} = t_{\text{пр}} + t_{\text{дов}} . \qquad (2)$$

В соответствии с МСПУ все составляющие выражений (1) и (2) рассматриваются как математические ожидания соответствующих случайных величин. При построении и расчете сетевых моделей предполагается, что продолжительность операций является случайной величиной с одинаковым типом распределения для всех операций.

В качестве такого закона распределения принимается β- распределение, так как оно отражает наличие как большого количества случайных факторов, каждый из которых оказывает незначительное влияние, так и случайных факторов, число которых невелико, а влияние существенно. В результате воздействия последних распределение вероятностей является асимметричным [2].

Для определения математического ожидания $(\bar{t})$ и дисперсии $(\sigma_I)^2$ продолжительности выполнения операций ремонта образца ТС и АСУ на практике используются соотношения на основе двух оценок, которые могут быть получены методом экспертного опроса.

Одна из оценок называется оптимистической и представляет собой минимально необходимое время для выполнения операции ($t_{\min}$).

Другая оценка – пессимистическая, она задает максимальное время на выполнение операции ($t_{\max}$).

Выражения для вычисления математического ожидания $(\bar{t})$ и дисперсии $(\sigma_I)^2$ имеют вид:

$$t_i = \frac{3 \times t_{\min} + 2 \times t_{\max}}{5} \qquad \sigma_i^2 = \frac{(t_{\min} - t_{\max})^2}{5}$$

Последующий анализ сетевой модели основан на центральной предельной теореме, согласно которой случайные продолжительности пути и операций имеют нормальное распределение, а математическое ожидание и дисперсия равны соответственно сумме математических ожиданий продолжительностей операций и их дисперсий [3]:

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^{n} t_i \qquad \sigma^2 = \sum_{i=1}^{n} \sigma_i^2$$

Исходя из определения свойства своевременности, еще одной важной характеристикой процесса ремонта ТС и АСУ является вероятность того, что продолжительность управления не превысит допустимое время, т. е. $p\,(T_{\text{упр}} \le T_{\text{упр}}^{\text{доп}})$.

Расчет этого показателя осуществляется по формуле:

$$p(T_{\text{упр}} \le T_{\text{упр}}^{\text{треб}}) = \Phi\left[\frac{T_{\text{упр}}^{\text{треб}} - T_{\text{упр}}^{p}}{\sigma}\right]$$

где Φ – функция нормального распределения,

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

В качестве показателя полноты процесса ремонта ТС и АСУ может быть использован коэффициент полноты [4]. Коэффициент полноты - это отношение числа реально выполненных операций по ремонту ТС и АСУ к требуемому их числу.

$$K_{п} = \frac{N_{\text{р}}}{N_{\text{треб}}}.$$

Таким образом, для оценки качества системы ремонта техники связи и автоматизированных систем управления наиболее существенными являются показатели оперативности, полноты. Используемые критерии для оценки качества системы ремонта техники связи и автоматизированных систем управления и конечных результатов его проведения должны учитывать конкретные условия подготовки и применения системы ремонта.

Список литературы

1. Плут М.Н., Губская О.А., Чихачев А.В. Направления и способы повышения эффективности существующей системы ремонта техники связи и автоматизированных систем управления. ВАС. СПб. Труды академии. Итоги науки и техники. НТС. 2018.

2. Плут М.Н., Федотов К.В., Шаталов А.В. Метод сетевого планирования и управления и его применение для проведения технического обслуживания на техники связи и автоматизированных систем управления стационарных узлов связи // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды IV Межвузовской НПК. СПб. 2019. С. 338 – 342.

3. Исаков Е.Е., Мякотин А.В., Губская О.А., Кривцов С.П. Оптимальная цифровизация военных систем связи // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». № 3-4. 2017. С. 22–26.

4. Плут М.Н., Мякотин А.В., Чубарев К.С., Кривцов С.П., Байсаитов Г.Н. Модель процесса метрологического обслуживания автоматизированных систем управления войсками Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2018. № 12. С. 63-67.

Плут Михаил Николаевич, канд. техн. наук, доцент, mplout@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Мякотин Александр Викторович, д-р техн. наук, профессор, aleksandrmyakotin@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного,

Чубарев Карп Сергеевич, канд. воен. наук, профессор, karp@chubarev.net, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного,

Кривцов Станислав Петрович, преподаватель, staskriv@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного,

Суслов Артем Николаевич, начальник учебной лаборатории, uccstp@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного

INDICATORS FOR ASSESSING THE QUALITY OF THE COMMUNICATION EQUIPMENT REPAIR SYSTEM AND AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

M.N. Plut, M.A. Myakotin, K.S. Chubarev, S.P. Krivtsov, A.N. Suslov

In this article, to assess the effectiveness of the repair system of communication equipment and automated control systems as the main criteria for its quality, the following indicators are proposed: efficiency and completeness, duration of management.

Key words: system of technical support of communication and automated control systems, repair system, communication equipment and automated control systems, efficiency index, completeness index, repair stages, method of network planning and management.

Plut Mikhail Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, mplout@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of Communications. Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,

Myakotin Alexander Viktorovich, doctor of technical Sciences, professor, aleksandrmyakotin@gmail.com, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of communications. Marshal Of The Soviet Union S.M. Budyonny,

Chubarev Karp Sergeevich, candidate of military sciences, professor, karp@chubarev.net, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of communications. Marshal Of The Soviet Union S.M. Budyonny,

Krivtsov Stanislav Petrovich, teacher, staskriv@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of communications. Marshal Of The Soviet Union S.M. Budyonny,

Suslov Artem Nikolaevich, head of the training laboratory, uccstp@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of communications. Marshal Of The Soviet Union S.M. Budyonny

УДК 658.56

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА СТЕНДА НА БИЕНИЕ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ В АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

М.В. Высоцкая, С.И. Орлова

Статья посвящена изучению качества испытательных стендов на биение тел вращения в авиационно-космической отрасли. В материале рассматривается методика количественной оценки характеристик с помощью коллективной оценки важности каждого параметра испытательного оборудования. С использованием методики количественной оценки характеристик выполнен анализ качества стенда на биение тел вращения ПБ-250М. Авторами были изучены технические характеристики испытательного стенда, группы показателей качества; был произведен расчет комплексной оценки качества. На основании полученных данных был подсчитан комплексный показатель качества, что помогло сделать вывод о качестве используемого стенда.

Ключевые слова: качество стенда, анализ, показатели, оценка качества, весовой коэффициент, комплексный показатель, коллективная оценка.

В настоящее время, основополагающую роль в функционировании предприятия играет качество выпускаемой продукции. Для контроля и мониторинга качества процесса производства необходимо проводить испытание продукции. Одной из ключевых особенностей контроля и анализа качества в авиационно-космической отрасли является проведение стендовых испытаний продукции.

Независимыми параметрами, такими как: точность измерения и управления режимами испытательных средств, степенью автоматизации исследований и уровнем математического обеспечения экспериментов, можно охарактеризовать функциональные элементы стенда [1].

Сложность испытательных стендов постоянно возрастает. Это зависит от большого количества причин, например, постоянное увеличение сложности летательного аппарата, следовательно, необходимостью контроля все большего числа параметров, характеризующих качество аппарата. Основной задачей анализа качества стенда является определение параметров, обеспечивающих максимальную эффективность испытаний [1].

В авиационно-космической отрасли используется большое количество тел вращения для функционирования процесса. Стенд ПБ-250М биениемер используется для определения биения цилиндрических деталей (валов, шкивов, шестерен), установленных в центрах. В современной технике разработано и используется множество различных видов двигателей. Имеющие в своем составе различные валы и шестерни, например, коленчатый вал, вал винта, ведущая шестерня редуктора, шестерня привода механизма газораспределения, шестерня передачи вращения в нагнетатель, шестерня привода крыльчатки нагнетателя, шестерня привода генератора и другие. Для качественного функционирования техники необходимо производить периодические испытания [2, 3].

В данной работе были изучены технические характеристики испытательного стенда, группы показателей качества; произведены расчет комплексной оценки качества и оценка показателей качества экспертами, на основании которых был получен комплексный показатель качества стенда.

За объект исследования принят контрольной стенд, для проверки изделий на биение в центрах ПБ-250М, предназначенный для контроля допуска радиального и торцевого биения тел вращения, установленных в центрах. Применяется в условиях металлообрабатывающих цехов авиационно-космической отрасли.

Приборы ПБ-250М состоят из станины, правой и левой бабок, узла каретки со стойкой индикатора, оснащенной микроподачей, индикатора часового. Правая бабка имеет подвижную пиноль с центром.

Для закрепления пиноли бабка имеет стопорное устройство. Центр левой бабки перемещается только вместе с последней. По особому заказу оба центра оснащаются твердым сплавом. Обе бабки могут перемещаться по направляющим станины и закрепляются на ней зажимами в любом месте в зависимости от длины проверяемой детали. Каретка со стойкой индикатора устанавливается напротив проверяемого участка и крепится на станине аналогично бабкам.

Индикатор закрепляется в державке зажимами. Грубая установка производится путем перемещения узла микроподачи по колонке, точная настройка - с помощью микроподачи.

Технические данные приведены в табл. 1.

Первым этапом оценки уровня качества является определение групп показателей качества, наиболее полно характеризующих уровень качества данного изделия. Основные группы показателей качества приведены в табл. 2.

Таблица 1

Технические характеристики стендов [4]

Наименование	ПБ-250М	ПБ-500М
1 Характеристика контролируемых деталей	Данные	
1.1 Измеряемые параметры	Радиальное и торцевое биение	
1.2 Диаметры контролируемых деталей, мм, не более: – валов; – дисков, шестерен и др.	 140 300	 140 300
1.3 Масса контролируемых деталей, кг, не более	13,5	50,0
2 Высота центров, мм, не более	160	160
3 Расстояние между центрам, мм, не менее	250	500
4 Принцип действия	Механический	
5 Метод измерения	Метод непосредственной оценки	
6 Цена деления шкалы индикатора часового типа ИЧ10 кл. 1, мм	0,01	0,01
7 Диапазон показаний шкалы индикатора часового типа ИЧ10 кл. 1, мм	0-10	0-10
8 Предел допускаемой погрешности прибора с индикатором часового типа ИЧ10 кл. 1, мм	±0,020	±0,032
9 Габаритные размеры (длина х ширина х высота), мм, не более	650х320х380	900х320х380
10 Масса прибора кг, не более	50	60

Таблица 2

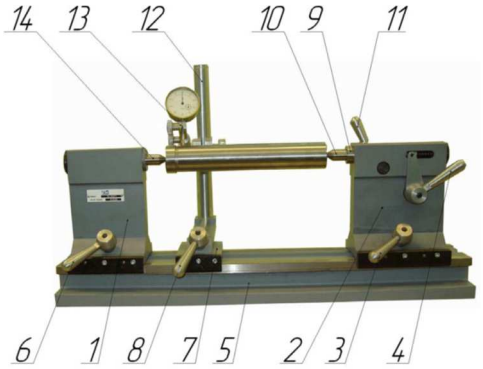
Группы показателей качества стенда ПБ-250М

Группы показателей качества	
Группа	Подгруппа
Показатели назначения	1 Радиальное биение
	2 Торцевое биение
	3 Диаметры контролируемых валов не более 140 мм
	4 Диаметры контролируемых дисков, шестерен не более 300 мм
Показатели технологичности и использования сырья	5 Высота центров не более 160 мм
	6 Расстояние между центрами не менее 250 мм
	7 Цена деления шкалы индикатора часового типа ИЧ10 кл. 1, 0,01 мм
	8 Диапазон показаний шкалы индикатора часового типа ИЧ10 кл. 1, 0-10 мм
Показатели безотказности и экологичности	9 Уровень шума 70 дБ
	10 Выделение токсичных веществ
Показатели эргономичности	11 Диапазон рабочих температур от −30 до +40 °С
	12 Принцип действия механический
	13 Метод измерения непосредственной оценки
	14 Габаритные размеры (длина х ширина х высота), 650х320х380 мм
	15 Масса прибора 50 кг
Показатели надёжности	16 Вероятность безотказной работы - не менее 0,95
	17 Масса контролируемых деталей 13,5 кг
	18 Предел допускаемой погрешности прибора с индикатором часового типа ИЧ10 кл. 1, ±0,020 мм
	19 Установленный срок службы 10 лет
	20 Техническое обслуживание 1 год

Расчет комплексной оценки качества. Для оценки перспективного уровня качества анализируются показатели качества лучших образцов [5]. В качестве образцового можно принять изделие современного производства, включающего в себя все лучшие показатели, достигнутые различ-

ными предприятиями и фирмами в изделиях данного вида. Этот образец должен быть того же класса, типа и назначения в фиксируемых условиях потребления, что и анализируемое изделие.

В данной работе в качестве образцового изделия принят ПБ-500М (табл. 3). Стенд для проверки изделий на биение в центрах, модель ПБ-500М, его принципиальная схема приведена на рисунке.



Общий вид существующего стенда ПБ500М:
1 – левая бабка; 2 – правая бабка; 3, 6, 8 – ручной зажим; 4 – рукоятка с рычагом; 5 – основание; 7 – каретка; 9 – подвижная пиноль; 10, 11 – стопорное устройство; 12 – стойка каретки; 13 – державка индикатора; 14 – центр

Таблица 3

Группы показателей качества стенда ПБ-500М

Группы показателей качества	
Группа	Подгруппа
Показатели назначения	1 Радиальное биение
	2 Торцевое биение
	3 Диаметры контролируемых валов не более 140 мм
	4 Диаметры контролируемых дисков, шестерен не более 300 мм
Показатели технологичности и использования сырья	5 Высота центров не более 160 мм
	6 Расстояние между центрами не менее 500 мм
	7 Цена деления шкалы индикатора часового типа ИЧ10 кл. 1, 0,01 мм
	8 Диапазон показаний шкалы индикатора часового типа ИЧ10 кл. 1, 0-10 мм
Показатели безотказности и экологичности	9 Уровень шума 16 Гц
	10 Выделение токсичных веществ
Показатели эргономичности	11 Диапазон рабочих температур от −30 до +40 °С
	12 Принцип действия механический
	13 Метод измерения непосредственной оценки
	14 Габаритные размеры (длина х ширина х высота), 900х320х380 мм
	15 Масса прибора 60 кг
Показатели надёжности	16 Вероятность безотказной работы - не менее 0,95
	17 Масса контролируемых деталей 50 кг
	18 Предел допускаемой погрешности прибора с индикатором часового типа ИЧ10 кл. 1, ±0,032 мм
	19 Установленный срок службы 10 лет
	20 Техническое обслуживание 1 год

При оценке качества комплексным методом возникает необходимость установления весомости свойств изделия, их важности с точки зрения полноты удовлетворения потребностей потребителей, для которых оно

предназначено. Весомость, значимость отдельных свойств, качественных характеристик изделия устанавливается с помощью коэффициентов весомости (g).

Оценку качества будем проводить по трёхбалльной шкале:

«отлично» - g=2 (в случае необходимого параметра);

«хорошо» - g=1 (в случае, когда эксперт затрудняется оценить важность параметра);

«удовлетворительно» - g=0 (в случае ненужного параметра).

Каждый эксперт по-разному оценивает важность того или иного параметра. Поэтому коллективу из 5 экспертов следует определить усредненное значение весового коэффициента (G) по **каждому** параметру:

$$G = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} g_{im}$$

Результаты оценки показателей качества приведены в табл. 4.

Таблица 4

Оценка показателей качества

Номер показателя качества	Весовые коэффициенты экспертов					Усредненное значение весового коэффициента G_i
	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	
1	1	1	2	2	1	1,4
2	2	2	2	1	2	1,8
3	2	1	2	1	2	1,6
4	2	1	2	1	1	1,4
5	2	2	2	2	2	2
6	1	1	1	2	1	1,2
7	2	1	2	1	1	1,4
8	2	2	2	2	2	2
9	2	2	2	1	1	1,6
10	2	1	2	1	2	1,6
11	2	2	2	2	2	2
12	2	1	2	1	1	1,4
13	2	2	2	2	2	2
14	2	2	2	1	2	1,8
15	2	2	2	2	2	2
16	2	1	2	1	1	1,4
17	2	1	2	1	1	1,4
18	1	2	2	1	1	1,4
19	2	1	2	1	1	1,4
20	1	2	1	2	1	1,4

В данной работе для получения количественной оценки качественных характеристик проводится коллективная оценка важности каждого параметра. Совместное мнение обладает большей точностью (согласованностью), чем индивидуальное мнение каждого из экспертов. **Количество экспертов играет особую роль.** С ростом числа экспертов в группе точность измерения повышается. В нашей работе оценку будут проводить 5 независимых экспертов.

Определим комплексный показатель качества реального и идеального изделия. Численное значение комплексного параметра качества K формируются каждым экспертом по всем параметрам:

$$K = \sum_{i=1}^{N} G_i \cdot q_{im}$$

Для идеального изделия, когда все параметры соответствуют уровню q_{im}=3, можно определить комплексный показатель K_{ideal}:

$$K_{ideal} = 3 \cdot \sum_{i=1}^{N} G_i = 3 \cdot 38 = 114$$

Таблица 5

Определение комплексного показателя качества

№ п.к	Наименование показателя	G_i	Оценка q_m				
			m=1	m=2	m=3	m=4	m=5
1	Радиальное биение	1,4	2	2	3	2	2
2	Торцевое биение	1,8	2	3	2	3	2
3	Диаметры контролируемых валов	1,6	2	2	2	2	2
4	Диаметры контролируемых дисков, шестерен	1,4	3	3	3	2	3
5	Высота центров	2	3	3	3	2	3
6	Расстояние между центрами	1,2	3	3	3	3	3
7	Цена деления шкалы индикатора часового типа ИЧ10 кл. 1	1,4	2	2	3	2	2
8	Диапазон показаний шкалы индикатора часового типа ИЧ10 кл. 1	2	3	3	3	3	3
9	Уровень шума	1,6	3	3	3	3	3
10	Выделение токсичных веществ	1,6	3	3	3	3	3
11	Диапазон рабочих температур	2	3	2	3	3	3
12	Принцип действия	1,4	3	3	3	3	3
13	Метод измерения	2	1	2	2	3	2
14	Габаритные размеры (длина х ширина х высота)	1,8	3	3	3	3	3
15	Масса прибора	2	3	2	3	1	3
16	Вероятность безотказной работы	1,4	3	3	3	2	3
17	Масса контролируемых деталей	1,4	1	2	3	2	2
18	Предел допускаемой погрешности прибора с индикатором часового типа ИЧ10 кл. 1	1,4	2	2	3	1	2
19	Установленный срок службы	1,4	2	2	3	3	2
20	Техническое обслуживание	1,4	3	3	3	3	3
Значение комплексного показателя							**Усредненная** оценка
Реальное изделие			80,8	82	91,2	79,2	84,2
Идеальное изделие			114	114	114	114	114

Для определения значений комплексного показателя необходимо усредненное значение весового коэффициента G_i умножить на уровень важности каждого показателя, по мнению каждого эксперта q_{im} по шкале от 1 до 3 баллов, затем просуммировать.

Определено, что показатели комплексной оценки качества контрольного стенда, для проверки изделий на биение в центрах ПБ-250М взятого в качестве исследуемого объекта, близки к показателям контрольного стенда, для проверки изделий на биение в центрах ПБ-500М взятого в качестве идеального изделия.

Заключение. В этой статье для анализа качества стенда используется квалиметрическая оценка характеристик.

Анализ качества и последующее улучшение испытательных стендов обеспечит [1]:

уменьшение временных затрат и сократит трудоемкость цикла эксперимента, благодаря подготовке и проведению эксперимента;

увеличение скорости получения, обработки и использования информации о качестве и надежности;

сокращение количества ошибок при измерении и обработке;

увеличение точности результатов экспериментальных данных и их достоверности.

С помощью коллективной оценки важности каждого параметра можно определить значение комплексного показателя, что поможет сделать вывод о качестве стенда. Данную методику можно применить для любой другой продукции авиационно-космической отрасли, если известны технические характеристики продукции.

Список литературы

1. Галеев А.Г., Захаров Ю.В., Макаров В.П., Родченко В.В. Проектирование испытательных стендов для экспериментальной отработки объектов ракетно-космической техники. М.: Изд-во МАИ, 2014. 283 с.

2. Углов Б.А. Авиационный двигатель АШ-62ИР: учебное пособие. Самар. аэрокосмич. ун-т. Самара: Изд-во СГАУ, 1992. 113 с.

3. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: учебник. М.: Машиностроение, 2008. Т. 1. 200 с.

4. Паспорт изделия ПБ.00.000 ПС. Прибор для проверки изделий на биение в центрах модели ПБ-250М, ПБ-500М, ПБ-1600 М, ООО НПП «Челябинский инструментальный завод», 2007. 16 с.

5. Чекмарев А.Н. Квалиметрия и управление качеством. Часть 1: учебное пособие. Самара: Изд-во СГАУ, 2010. 172 с.

Высоцкая Мария Владимировна, аспирант, Manya_93@mail.ru, Россия, Самара, Самарский национальный исследовательский университет им. Академика С.П. Королева,

Орлова Светлана Игоревна, инженер, orlovasv15@mail.ru, Россия, Самара, Самарский национальный исследовательский университет им. Академика С.П. Королева

QUALITY ANALYSIS OF THE STAND FOR BEATING BODIES OF ROTATION IN THE AVIATION AND SPACE INDUSTRY (AKO)

M.V. Vysotskaya, S.I. Orlova

The article is devoted to the study of the quality of test stands for the beating of bodies of revolution in the aerospace industry. The material discusses the method of quantitative assessment of characteristics using a collective assessment of the importance of each parameter of the test equipment. Using the methodology for the quantitative assessment of characteristics, an analysis of the quality of the bench for the runout of bodies of revolution PB-250M was performed. The authors studied the technical characteristics of the test bench, a group of quality indicators; A comprehensive quality assessment was calculated. Based on the data obtained, a comprehensive quality indicator was calculated, which helped to draw a conclusion about the quality of the stand used.

Key words: stand quality, analysis, indicators, quality assessment, weight coefficient, complex indicator, collective assessment.

Vysotskaya Maria Vladimirovna, postgraduate, Manya_93@mail.ru, Russia, Samara, Samara National Research University,

Orlova Svetlana Igorevna, engineer, orlovasv15@mail.ru, Russia, Samara, Samara National Research University

МАШИНОВЕДЕНИЕ, СИСТЕМЫ ПРИВОДОВ И ДЕТАЛИ МАШИН

УДК 621.43

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫХ ЭТАПОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК ЦИЛИНДРОВ ДИЗЕЛЕЙ МЕТОДОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

А.В. Груничев, Д.В. Павлов, А.Н. Подъемщиков, Р.Н. Хмелев

Представлены результаты исследования процесса получения чугунной отливки цилиндра дизеля 1Ч9,5/8,0 с воздушным охлаждением с использованием математических моделей процесса литья и образования дефектов в процессе кристаллизации и остывания расплава в форме с применением программного комплекса СКМ ЛП «ПолигонСофт».

Ключевые слова: цилиндр дизеля, отливка, вычислительный эксперимент, СКМ ЛП «ПолигонСофт».

В настоящее время наиболее перспективным способом создания деталей и узлов поршневых двигателей внутреннего сгорания (ПДВС) является использование CIM-технологий (Computer Integrated Manufacturing – комплексное автоматизированное производство [1]). Важнейшим элементом CIM-технологий являются проблемно-ориентированные программные комплексы CAE (Computer-Aided Engineering – интегрированные программные средства моделирования функционирования проектируемого объекта [1]), базирующиеся на современных математических моделях.

Современный этап теоретических исследований в области двигателестроения характеризуется большим разнообразием применяемых математических моделей, сложность которых постоянно возрастает. Эволюция моделирования ПДВС в настоящее время происходит в направлении все боле детального учета множества различных факторов, повышения точности и придания моделям натурных свойств. Причем модели способны давать информацию о ПДВС, которую затруднительно или невозможно получить экспериментальным путем [2].

В данной статье приведены результаты исследования процесса получения чугунной отливки 1Ч9,5/8,0 цилиндра дизеля с воздушным охлаждением. Цилиндр является одной из наиболее ответственных деталей ПДВС и работает в условиях переменных давлений и температур в надпоршневой полости [3].

К отливке цилиндра предъявляются высокие требования износостойкости, прочности при ограниченных размерах в диаметрах, по высоте и толщине цилиндра [3].

Вычислительные эксперименты процессов литейного производства рассматриваемых цилиндров осуществлялись с помощью программы СКМ ЛП «ПолигонСофт» 16.5 [4]. Система компьютерного моделирования литейных процессов СКМ ЛП «ПолигонСофт» позволяет разработать и/или оптимизировать некоторые наиболее важные этапы технологического процесса не на реальной отливке, а на ее цифровом прототипе, что снижает затраты на проектирование и доводку литейной технологии и себестоимость продукции.

Рассматриваемый программный комплекс позволяет моделировать перенос тепла (теплопроводностью, конвекцией, излучением) при кристаллизации, образование усадочных дефектов (раковины, макро- и микропористость), заполнение формы расплавом, напряжения и деформации после затвердевания отливки [4].

В данной работе для технологического процесса получения отливок цилиндра 1Ч9,5/8,0 дизеля были решены следующие задачи:

анализ проливаемости формы;

установление закономерностей падения температуры расплава в процессе заполнения формы и характера затвердевания отливки;

установление закономерностей образования усадочных раковин, макро- и микропористости и остаточных напряжений.

Решение перечисленных выше задач направлено на уменьшение процента брака отливок, а также сокращения сроков отработки технологических процессов литейного производства.

При математическом моделировании процесса получения отливки использовались следующие исходные данные:

трехмерная геометрическая модель формы;

конечно-элементная сетка, подготовленная во внешнем генераторе ANSYS;

теплофизические свойства формы и сплава (определялись на основе базы данных модуля «Сплав» СКМ ЛП «ПолигонСофт»);

усадочные свойства сплава (определялись на основе базы данных модуля «Сплав» СКМ ЛП «ПолигонСофт»);

механические свойства сплава [5 - 8];

начальные и граничные условия (определялись на основе технологической документации процесса получения отливок).

В ходе моделирования процесса получения отливки цилиндра дизеля были получены следующие результаты:

1. Поля скоростей течения при заполнении формы расплавом (файл гидродинамики);

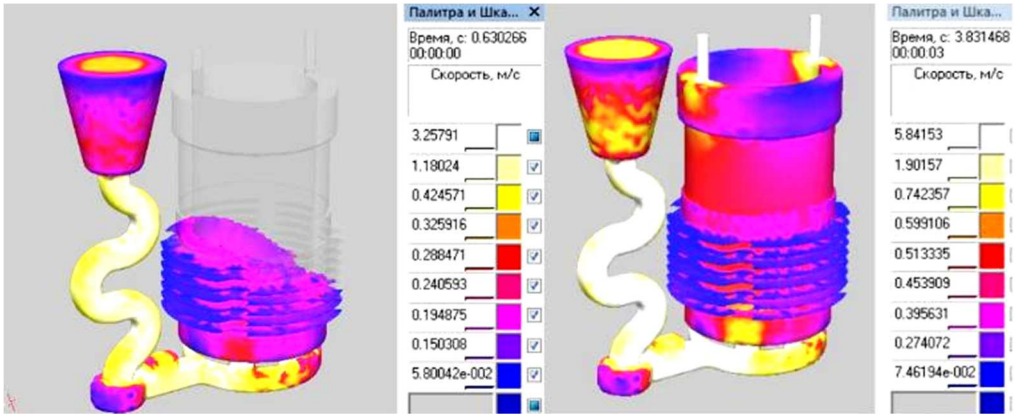
2. Распределение температурных и фазовых полей в процессе остывания отливки (файл температур);

3. Поля микро и макро пористости (файл пористости);

4. Поля интенсивности напряжений, деформации и перемещений (файл деформаций).

Файл гидродинамики формируется в модуле Эйлер и представляет собой визуализацию процесса заполнения формы расплавом с расчетом полей скоростей течения. На рис 2 приведены изображения с частичным и полным заполнением модели отливки цилиндра расплавом.

Результаты, показанные на рис. 1, б являются исходными данными для расчетов температурных и фазовых полей. Из рис. 1 видно, что форма полностью проливается, однако скорость расплава в оребрении близка к 0, что может быть причиной непроливов ребер при конструктивном увеличении длины и уменьшении проходного сечения ребра цилиндра.



а ***б***

Рис. 1. Визуализация процесса заполнения формы расплавом: а – форма частично заполненная расплавом; б – форма полностью заполненная расплавом

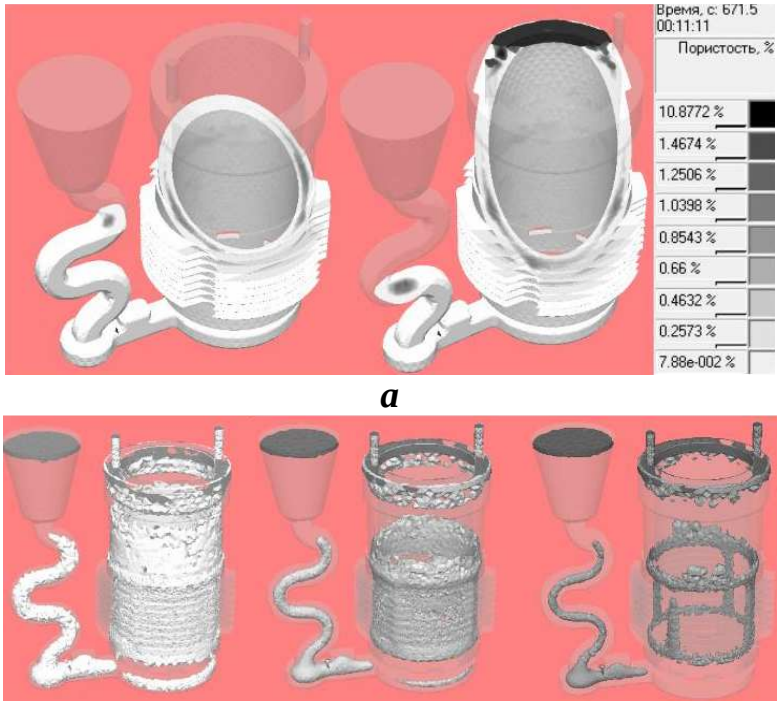
Сформированный в программе файл пористости демонстрирует образование макро и микро пористости в динамике при остывании отливки, с момента полного заполнения формы расплавом.

Используемые в программе математические модели учитывают появление двух видов усадочных дефектов: первый – макропористость и раковины, второй – микропористость. Каждый из них имеет свой собственный механизма образования [9].

Макропористость образуется при недостатке питания во время усадки при кристаллизации расплава выше зеркала расплава или его условного эквивалента в двухфазной зоне. В математической модели образования макропористости, реализованной в программе СКМ ЛП «ПолигонСофт», решается задача возникновения и движения зеркал расплава. Макропористость может достигать величин 10…30 % и в пределе образовывает концентрированную раковину (100 % пористости).

Микропористость образуется при недостатке давления ниже зеркала, то есть в области потенциально достаточного питания жидким расплавом. Падение давления в таких зонах с относительно хорошим питания вызван следующими факторами: суммарной объемной усадкой, затруднен-

ным фильтрационным характером движения жидкой части металла в двухфазной зоне с образовавшимся дендритным каркасом, изоляцией от внешнего давления при формировании твердой фазы на границах приложения давления. Для адекватного расчета распределения давления в математической модели выполняется решение дифференциального уравнения фильтрационного течения. Падение давления ниже некоторого критического значения, создают условия для появления поверхности раздела и формирования микропоры, которая далее будет расти в соответствии с объемной усадкой. Микропористость не может быть много больше величины объемной усадки при затвердевании, которая обычно составляет 3…5 %. На рис. 2 изображены результаты расчета пористости отливки рассматриваемой детали.



а

б ***в*** ***г***

Рис. 2. Результаты расчета пористости отливки: а – распределение полей пористости (произвольное сечение); изображение изометрических поверхностей пористости: б – 0,2572 %; в – 0,8543 %; г – 1,25 %

Температурный расчет и расчет пористости выполняются одновременно. Таким образом, можно сопоставить по времени при какой температуре происходит образование пористости той или иной величины.

Также, были сопоставлены результаты расчета микро и макро пористости с результатами не симметричной разноплотности внутренней структуры чугуна цилиндра, приведенными в работе [9] и полученными в результате томографических исследований внутренней структуры цилиндра.

На рис. 3 приведена рентгенограмма заготовки рассматриваемого цилиндра с протомографированными сечениями 1, 2, 3 [9].

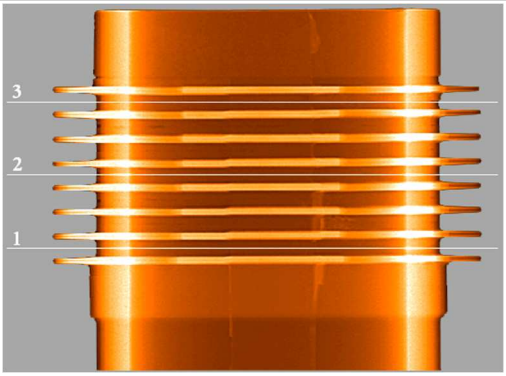
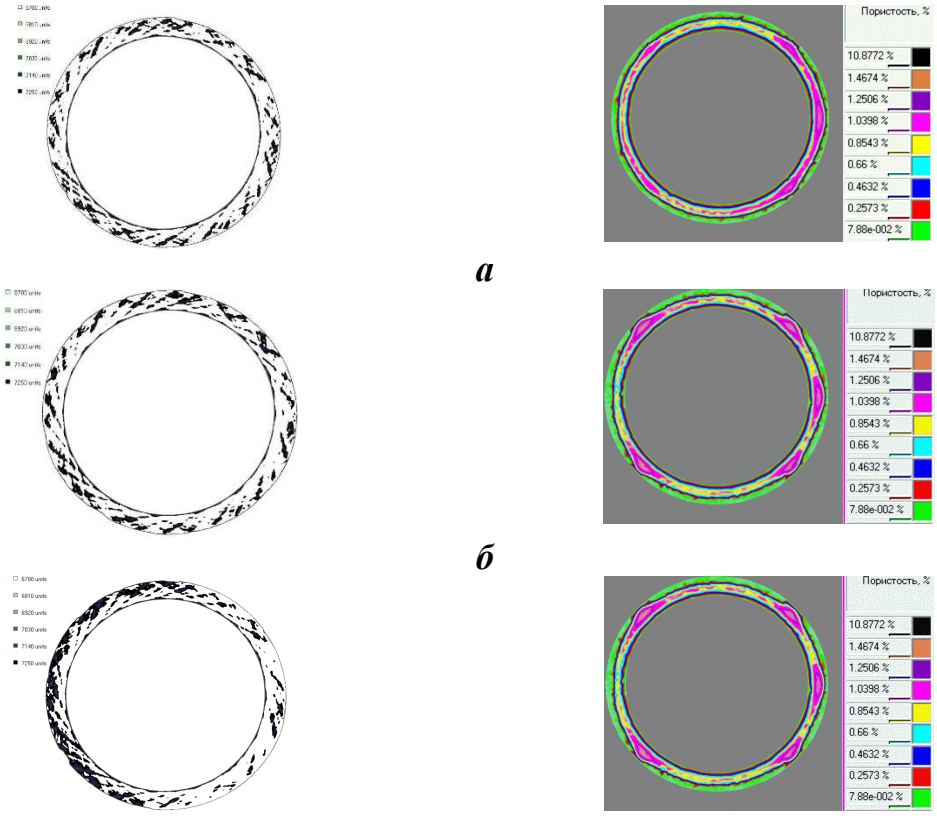


Рис. 3. Рентгенограмма заготовки цилиндра с протомографированными сечениями 1, 2, 3 [9]

Сечение 3 на ренгенограмме и на модели находится в зоне самого высокого давления порядка 80 атмосфер и температур порядка 1300… 1400 °С. Сечения рентгенограмм представляют собой матрицы плотностей элементарных ячеек трансформированные с помощью специальной программы в уровни серого [9].

Расчетные сечения представляют собой области элементной сетки, трансформированные программой в уровни цветового градиента. Каждому градиенту соответствует процентное соотношение пористости.

Сравнение соответствующих сечений ренгенограмм [9] с результатами расчета пористости приведено на рис. 4.



а

б

в

Рис. 4. Сравнение сечений ренгенограмм с результатами расчета пористости: а – сечение 1; б – сечение 2; в – сечение 3

Результаты, приведенные на рис. 4 показывают, что области малых плотностей предположительно располагаются вдоль характеристик – линий пластического течения, которые наблюдаются в образцах кольцевых (трубчатых) деталей при пластических деформациях. Такой результат свидетельствует о необходимости поиска механизмов образования областей малой плотности при отливке заготовок цилиндра, связанных с пластическими деформациями при затвердевании.

Файл расчетных деформаций был получен в модуле Гук и демонстрирует поля интенсивности деформаций во времени, поля интенсивности напряжений (рис. 5), поля отклонения геометрических размеров. Расчет синхронизирован по времени с тепловым расчетом для сопоставления полей напряжений и пористости в результате остывания отливки.

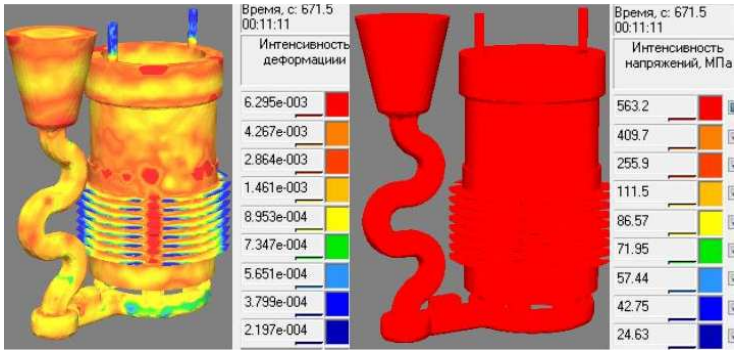


Рис. 5. Результаты расчета интенсивности деформации и сформировавшегося напряжения в отливке

Полученные с помощью программы СКМ ЛП «ПолигонСофт» результаты вычислительных экспериментов являются основой для дальнейших исследований, направленных на уменьшение процента брака отливок, а также сокращения сроков отработки технологических процессов литейного производства цилиндров дизелей.

Список литературы

1. Яманин А.И., Голубев Ю.В., Жаров А.В., Шилов С.М., под редакцией профессора Яманина А.И. Компьютерно-информационные технологии в двигате-лестроении: учебное пособие. М.: Машиностроение, 2005. 480 с.

2. Хмелев Р.Н. Математическое и программное обеспечение системного подхода к исследованию и расчету поршневых двигателей внутреннего сгорания: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 229 с.

3. Луканин В.Н., Алексеев И.В., Шатров М.Г. и др. Двигатели внутреннего сгорания. Динамика и Конструирование: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2007. 400 с.

4. СКМ ЛП ПолигонСофт. [Электронный ресурс] URL: http://www.poligonsoft.ru/poligonsoft/ (дата обращения: 20.01.2020).

5. Металлические материалы: справочник. Минск: Высшая школа, 1987. 368 с.

6. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Стандартинформ, 2005. 24 с.

7. ГОСТ 9651-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах. 1986. 6 с.

8. МР 1 03-83. Методические рекомендации. Расчёты и испытания на прочность. Экспериментальные методы определения напряженно-деформированного состояния элементов машин и конструкций. Определение макронапряжений рентгеновским методом. М.: ВНИИНМАШ, 1983. 48 с.

9. Тихомиров М.Д. Моделирование тепловых и усадочных процессов при затвердевании отливок из высокопрочных алюминиевых сплавов и разработка системы компьютерного анализа литейной технологии: автореф. дис. … канд. техн. наук. СПб, 2005. 20 с.

10. Дронов Е.А., Барахов В.И., Самочкин В.Н. Применение рентгеновской вычислительной томографии для определения причины заклинивания цилиндра дизельного двигателя // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 12. Ч. 2. С. 39-46.

Груничев Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент, aiah@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Павлов Денис Викторович, аспирант. aiah@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Подъемщиков Александр Николаевич, канд. техн. наук, доцент, aiah@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Хмелев Роман Николаевич, д-р техн. наук, профессор, aiah@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

THE STUDY OF THE FINAL STAGES OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF PRODUCING CYLINDERS CASTINGS OF DIESEL ENGINES BY THE METHOD OF CALCULATING EXPERIMENT

A.V. Grunichev, D.V. Pavlov, A.N. Podyemshikov, R.N. Khmelev

The results of the study of the process of obtaining cast iron casting of air-cooled diesel cylinder are described using mathematical models of the casting process and the forming of defects in the process of crystallization and cooling of the melt in the form using the software complex CSS PoligonSoft.

Key words: diesel cylinder, casting, computational experiment, CSS PoligonSoft.

Grunichev Alexander Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, aiah@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Pavlov Denis Viktorovichs, graduate student, aiah@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Podyemshikov Alexander Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, aiah@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Khmelev Roman Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, aiah@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.9.004

ПРОЦЕССЫ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ СМЕСЬЮ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ И ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВАХ

В.Н. Гадалов, А.Е. Гвоздев, В.Р. Петренко, А.А. Иванов, А.В. Филонович, А.А. Калинин, И.А. Макарова

Рассмотрены вопросы реновационной деятельности и ее задачи в условиях современного промышленного производства. Показано, что электроакустическое нанесение покрытий с применением смеси самофлюсующихся сплавов на никелевой и железной основах является прогрессивной технологией для упрочнения и восстановления деталей машин и инструмента. Рассмотренные его возможности и перспективы развития указанной технологии с последующей обработкой электроакустических покрытий поверхностнопластическим деформированием (выглаживанием) или лазерным облучением.

Ключевые слова: электроакустическое нанесение покрытий (ЭЛАНП), выглаживание, лазерная обработка (ЛО), электродные материалы – сплавы на никелевой (ПГ-10Н-01) и железной (ПГ-ФБХ-2) основах, смеси, индентор для выглаживания, нанокристаллическая и аморфные структуры, фазовый состав, физико-механические свойства, износостойкость, шероховатость.

При открытой рыночной экономике расширение промышленного производства невозможно без решения проблемы повышения качества и конкурентоспособности выпускаемых машин. Одним из таких подходов в развитии всех отраслей промышленности является «реновация» - системная деятельность по повторному использованию средств материального производства и модернизации эксплуатируемой технике [1]. Одной из основных задач реновационной деятельности и развития машиностроения является повышение качества, надежности, долговечности и эффективности использования машин и оборудования. Известно, что до 70 % причин выхода из строя машин и механизмов связано с износом узлов трения. Ежегодно огромное количество деталей и узлов выбраковываются и поступают на переплавку из-за износа рабочих поверхностей в доли миллиметра или других дефектов, возникающих в процессе эксплуатации, которые могут быть устранены тем или иным способом обработки.

Восстановление деталей – это комплекс операций по устранению основных дефектов деталей, обеспечивающих возобновлению ее работоспособности и параметров, установленных в нормативно-технической документации, позволяющий повторно, а иногда и многократно использовать исчерпывающий ресурс деталей и узлов в целом.

Восстановление работоспособности узлов и оборудования различной техники достигается ремонтом. Одним из путей улучшения качества является многократное восстановление формы деталей металлопокрытиями и обеспечение их взаимозаменяемости.

Износостойкие покрытия малоресурсных (слабых) деталей - самый быстрый, дешевый и эффективный путь решения проблемы увеличения ресурса машин. Малоресурсные детали являются также главной причиной отказов машин и их простоев, разборки, ремонта. Эти же детали заменяются наиболее часто и их замена или восстановление - главный элемент затрат при ремонте машин, Затраты на упрочнение слабых деталей несоизмеримо меньше расходов, связанных с их недостаточной износостойкостью.

Стоимость восстановления деталей составляет 25…40 % стоимости новых.

В настоящее время и в будущем проблеме восстановления и упрочнения деталей уделяется большое значение. Восстановление деталей после ремонта экономически выгоднее изготовления новых, так как способствует экономии металла, рабочей силы, материальных и топливноэнергетических ресурсов. Но сложившаяся технология ремонтных работ, их культура и организация находятся на чрезвычайно низком уровне и не обеспечивают полноценного восстановления работоспособности оборудования. Так средние затраты на ремонт и межремонтное обслуживание в России в 5…7 раз превышают затраты на изготовление новых машин.

Очевидно, что ремонтные процессы нуждаются в коренном изменении технологии и в широком использовании современных упрочняющих технологий и материалов, придания им новых свойств. Повышение надежности отремонтированной техники (станков, автомобилей, тракторов и др.) за счет применения прогрессивных технологий имеет первостепенное значение и требует глубоких познаний в физике старения и износа конструкционных материалов, а также знанием прогрессивных методов отделки и упрочнения поверхностного слоя деталей. Совершенствование технологии упрочнения материалов, придание им антифрикционных, износокоррозионностойких свойств повышенных эксплуатационных характеристик всегда было и остается перспективным направлением в машиностроении [2].

В связи с вышеуказанным технически и экономически целесообразно реализовать новый подход к выбору материалов для покрытий. Механическая прочность деталей или инструмента гарантируется за счет применения одного материала, а сопротивление воздействию внешних (износу, коррозии и др.) - обеспечивается локальным формированием на их поверхности тонких слоев со специальными функциональными свойствами. В результате обеспечивается повышенная работоспособность детали и инструмента. При этом возможно создание изделий с уникальным сочетанием свойств, недостижимых при использовании конструкционных и инструментальных материалов, например, жаропрочность и жаростойкость, аморфное состояние поверхности деталей и инструмента различной конфигурации и размеров и др.

В настоящее время технология электрофизического нанесения покрытий широко используется как при изготовлении, так и при ремонте деталей машин и механизмов, а также инструмента, изношенных при эксплуатации. Особенно перспективно нанесение покрытий при восстановлении изношенных деталей, так как их повторное (или многократное) использование позволяет сократить затраты на новые запасные части и, кроме того, уменьшить эксплуатационные расходы в хозяйствах и на предприятиях благодаря увеличению срока службы восстановленных деталей. Это тем более важно, поскольку стоимость запасных частей в себестоимости капитального ремонта машин достигает 50…70 %.

Задачей разработки метода управления свойствами поверхности занимается инженерия поверхности. Эти методы могут быть разделены на две основные группы нанесение покрытий и модифицирование поверхности. В первом случае изменение свойств поверхностей осуществляется за счет формирования на поверхности слоя с иным, отличным от основного материала составом. Во втором - изменение свойств поверхности осуществляется за счет изменения структурного состояния поверхностных слоев детали, инструмента (аморфизации, созданием нанокристаллических и метастабильных фаз и др.) или его легированием.

Среди разнообразных технологий нанесения защитных покрытий за последнее время интенсивное развитие получила группа электрофизических методов, к которой относится электроискровое легирование, электроакустическое нанесение покрытий, вакуумно-дуговые КИБ (конденсация при ионной бомбардировке) и РЭП (реактивное электронно-плазменное напыление), электродуговая металлизация, а также в определенной мере лазерная обработка – напыление.

Метод электроискрового легирования (ЗИЛ) и его разновидность электроакустическое нанесение покрытий (ЭЛАНП) одна из ресурсосберегающих технологий, позволяющая в машиностроении и ремонтном производстве упрочнять и восстанавливать размер высокоточных изношенных инструментов и деталей, придав им одновременную высокую износостойкость.

При ЭИЛ разогрев деталей и инструментов не существенен, что исключает их коробление и в большинстве случаев не требует финишной механической обработки. Процесс ЭИЛ, то есть перенос электродного материала с анода на катод осуществляется по механизму контактомостикового переноса, реализующегося в момент касания электродов, путем переноса жидкой, паровой и твердой составляющих эрозии через газовый промежуток.

Главной трудностью процесса ЭИЛ является выбор материала легирующего электрода. До последнего времени их изготовляли в основном из твердых сплавов марок ТК и ВК. Данный выбор связан с высоко твердостью получаемых покрытий при упрочнении режущего инструмента, но одним из недостатков вышеуказанных материалов является низкая интен-

сивность наращивания покрытий из-за высокой температуры плавления кобальтовой связки, а, следовательно, трудности реализации жидкопарового переноса составляющих эрозии.

Сплавы на никель-хромовой основе практически соответствую основным критериям, включающим смачиваемость материала катода связкой композита; образование твердых растворов между компонентами связки и катода; «кольцевая структура», в которой зерна дисперсной твердой фазы (карбиды, бориды) обволакиваются материалами связки и переносятся в результате интеркристаллитного разрушения; оптимальное соотношение между температурами плавления материалов анода и катода (температура плавления анода не должна превышать температуру плавления катода более чем в 4 раза).

Известно, что при газопорошковой наплавке широко применяются самофлюсующиеся порошки на никель-хромовой основе благодаря их высокой твердости и износостойкости и относительно низкой температуре плавления жидкой фазы, не превышающей 1050…1080 ^{0}C. Структура наплавленных покрытий представляет собой твердый раствор на основе никеля и эвтектическую смесь боридов, карбидов и силицидов никеля и хрома с твердым раствором на основе никеля.

Высокая стоимость порошков, изготовляемых из сплава никеля, привело к разработке более дешевых сплавов на основе железа для газотермических методов напыления (ГТН), Условия сверхбыстрого охлаждения частиц дисперсного материала при газотермическом напылении создают принципиальные предпосылки образования в покрытиях аморфных, нанокристаллических и метастабильных фаз. Это обстоятельство определило тенденцию в разработке новых материалов для ГТН, обеспечивающих формирование покрытий с нетрадиционной структурой, обладающей повышенными эксплуатационными свойствами. К ним относятся порошки и порошковые проволоки серий «АРМАКОР» (АТИ США) и «АМОТЕК» (ИЭСИМ им. Е.О. Патона, Украина). Возможность сохранения в газотермических покрытиях тонкодисперсных включений твердой фазы (TiC, CrB_2 и т.п.) размером 10…200 нм, имеющихся в исходных порошках, стимулирует в последнее время развитие работ в области ГТН покрытий с нанокристаллической структурой. Однако методами газопорошковой наплавки и ГТН часто не удается получать качественные покрытия на массивных деталях с большими упрочняемыми поверхностями, а также получать тонкие покрытия с высокой прочностью сцепления без потери твердости.

В связи с этим поставлена задача получения покрытий из самофлюсующихся порошков на основе никеля и железа, легированных хромом с присадками бора, кремния углерода и марганца (табл. 1) электроакустическим методом ЭЛАНП на установке «ЭЛАН-3». Для решения этой задачи необходимо было исследовать структуру, фазовый состав и свойства электроакустических покрытий, полученных с использованием смеси само-

флюсующихся гранулированных сплавов на основе никеля (ПГ-10Н-01) и железа (ПГ-ФБХ6-2). Содержание порошка ПГ-10Н-01 изменяют от 10 до 90% (табл. 2).

Таблица 1

Химический состав электродных материалов для ЭЛАНП

№, марка сплава	Содержание компонентов, масс. %						
	Ni	Fe	Cr	B	Si	C	Mn
1. ПГ-10Н-01	ост.	3…7	14...20	2,8…4,2	4…4,5	0,6…1	-
2. ПГ-ФБХ-2	-	ост.	32…37	1,3…2	1…2,5	3,5…5,5	1,5…4

Таблица 2

Состав и свойства покрытий, полученных ЭЛАНП

№, сплава	Содержание компонентов, %		Адгезионная прочность, (относительная) ±5%	Твердость HV10, МПа (±5%)	Интенсивность изнашивания, мг/км (±3%)
	ПГ-10Н-01	ПГ-ФБХ-2			
1	100	0	1,0	7100	2,55
2	90	10	0,97	7250	2,56
3	80	20	0,95	7460	2,44
4	70	30	0,94	7600	2,42
5	60	40	0,91	7630	2,41
6	50	50	0,90	7740	2,41
7	40	60	0,88	7920	2,22
8	30	70	0,91	7730	2,33
9	20	80	0,97	7210	2,56
10	10	90	0,98	5770	2,78

Процесс электроакустического напыления основан на использовании энергии электроискрового разряда и ультразвука [3-18]. Напыляемый образец (деталь, инструмент) подключен к отрицательному полюсу источника тока, электрод к положительному. Время электроискрового разряда синхронизировано с положением электрода относительно обрабатываемой поверхности. Временное смещение осуществляется фазодвигателем с шагом через 36°. Электроискровой разряд может осуществляться на подходе обрабатываемой поверхности, в момент контакта и на отходе от поверхности.

Механические продольно-крутильные ультразвуковые колебания [3] сообщаемые электроду, образуют при контактировании с обрабатываемой поверхностью межэлектродный зазор, равный амплитуде колебаний в электроде 5…10 мкм, меняющихся во времени приближенно по синусоидальному закону с частотой 19…23 кГц.

Частота следования технологического электроискрового разряда кратна частоте ультразвуковых колебаний электрода и находится в пределах от четырех импульсов технологического тока на один период до одного импульса технологического тока на тридцать два периода.

Ультразвуковая колебательная система предназначена для преобразования электрических колебаний в механические колебания с ультразвуковой частотой. [3, 8, 10].

Посредством ультразвуковых колебаний в процессе электроакустического напыления реализуются две основные функции [10, 11, 13]:

1) формирование необходимого зазора для обеспечения импульсного электрического разряда за счет амплитуды ультразвуковых колебаний;

2) механическое воздействие на напыляемый инструмент комплексными продольно-крутильными колебаниями.

Ультразвуковая колебательная система является резонансной системой. В используемом диапазоне частот системы находится несколько резонансов, т.е. за счет изменения частоты ультразвукового генератора можно варьировать амплитудой механических колебаний электрода.

Сущность настройки ультразвуковой колебательной системы заключается в установлении частоты колебаний, соответствующей одному из резонансов. Выбор рабочего резонанса определяется технологическими параметрами процесса напыления. Комплексные продольно-крутильные колебания, сообщаемые электроду, позволяют осуществлять напыление - легирование любой точкой поверхности электрода.

Кроме того, наносимый материал и упрочняемый материал испытывают ударное воздействие. Цикл нанесения единичной порции расплава при ЭЛАН длится менее 10 мс. За это время происходит разогрев, расплавление и затвердевание наносимого материала. Поскольку толщина слоя расплава на поверхности обычно массивно упрочняемой детали или инструмента при этом не превышает 50 мкм, скорость охлаждения его больше 10^5 к/с. Это позволяет использовать метод ЭЛАН для получения слоев с кристаллическими метастабильными фазами и аморфной структурой [4, 8-10, 13].

В современной металлофизике и металловедении быстрое развитие получило научное направление, связанное с изучением эффектов неравновесного затвердевания металлических сплавов в условиях высоких и сверхвысоких скоростей охлаждения расплавов. Совершенствование оборудования и технологии получения быстро охлажденных сплавов позволили обнаружить ряд эффектов, связанных с разным изменением структуры и свойств таких материалов. Накопление обширного статического материала позволило определить условия формирования нано и аморфных структур и установить закономерности их образования [19-34]. Изучение аморфного состояния, а также различных свойств аморфных материалов и сплавов с наноструктуированной поверхностью увеличивает возможность их применения в качестве резисторных, магнитомягких и конструкционных материалов, а также различного рода покрытий.

Фазовый состав покрытия изучали на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-4М» в $К_\alpha$ кобальтовом излучении в угловом интервале 35…105° с автоматической регистрацией дифракционных отражений на самописце при скорости движения счетчика 2 град/мин и в угловом интервале 50…60° с регистрацией на цифропечатающем устройстве накопленных импульсов за 100 с при поворотах образца на 0,1°. Также снимали и дебаеграммы в $К_\alpha$ хромовом излучении.

Параллельно фазовый состав износостойкого комплекса исследовался с помощью рентгеноструктурного анализа на автоматизированном дифрактометре «ДРОН-4», оснащенном компьютерным управлением и записью спектров. Симметричная съемка образцов на отражение проводилась с использованием рентгеновских трубок с медным и кобальтовым излучением. Это позволило оценить (усредненно) фазовой состав на разном расстоянии от поверхности (до 13,7 и до 2 мкм соответственно). В отдельных случаях для определения фазового состава тонкого поверхностного слоя от 1,0 до 0,5 мкм, использовался метод скользящего пучка (Cu K_α - излучение) с постоянным углом входа $\alpha = 5°$. Обработка спектров проводится с помощью программного обеспечения.

Шероховатость измеряется с помощью профилографа - профилометра с компьютерным обеспечением фиксации результатов измерения, их обработки, вывода и распечатки на стандартном принтере.

Профиломер с информационно-вычислительным комплексом представленный на (рис. 1) применяется для анализа результатов измерения параметров шероховатости поверхности деталей. Электрическая часть прибора реализована в виде платы расширения, встраиваемой в ПК. Пределы измерения 0,02…100 мкм, длина трассы сканирования до 12 мм, скорость трассирования 0,51 и 2 мм/с. Программное обеспечение позволяет в диалоговом режиме управлять процессом измерения, выбирая оптимальные режимы, вычислять параметры шероховатости, выводить на экран монитора и анализировать геометрические особенности микропрофиля. Результаты измерений сохраняются в памяти ПК и могут быть распечатаны в виде протокола.



Рис. 1. Профиломер с информационно-вычислительным комплексом

Изготовление поперечных шлифов для металлографических исследований осуществляли по стандартной методике на оборудовании фирмы Struhers (Дания) в состав которого входит универсальный отрезной станок, автоматический гидравлический пресс и прибор для полировки микрошлифов. Измерение микротвердости образцов и покрытий проводили на микроскопах: «ПМТ - 3М» и «POLYVAR» (Австрия), оснащенном подставкой для измерения микротвердости «MICRO - DVPOMAT- 4000».

Микроструктура покрытий изучалась методами оптической и электронной микроскопии на приборах «МИМ - 8», «ЭПИКВАНТ», «ЭМВ-100Б» соответственно.

Поскольку структура электроакустических слоев из порошковых сплавов, представленных в табл. 1 и 2 ранее не изучалось, необходимо для установления общих закономерностей формирования метастабильных кристаллических и аморфных фаз провести комплексное металлофизическое исследование.

В настоящей работе ЭЛАНП проводилось электродом из самофлюсующихся эвтектических сплавов ПГ-10Н-01 сплав 1, 2 табл. 1 и сплав 5 табл. 2 на оптимизированном режиме установке «ЭЛАН-3» (рис. 2, 3).

Нами также предлагается электрод НОУ - ХАУ из порошковой проволоки в металлической оболочке, а также для обработки металлических расплавов, включающий формовку оболочки из металлической ленты в профильных валковых калибрах формовочных клетей, заполнение оболочки порошковыми материалами, формирование замкового соединения и последующее редуцирование.

Металлографическими исследованиями установлено, что на поверхности стали 30ХГСА, образуется белый нетравящийся слой переменной толщины.

Его микротвердость 11500…12000 МПа. Покрытия имеют слоистое строение, характерное для напыленных структур. В покрытии, кроме аморфной, присутствуют кристаллические фазы. Одной из причин неполной амортизации при ЭЛАНП может быть растворение в поверхностном слое больших количеств металла основы, так как при ЭЛАНП кроме переноса капель расплава с анода на катод происходит оплавление катода. Поэтому химический состав покрытия особенно в переходной зоне между покрытием и основой, значительно отличается от состава легирующего электрода. Кроме того, частично выгорают легкие элементы - углерод и фосфор. Отклонение от исходного состава затрудняет получение аморфной структуры, но может облегчить образование метастабильных кристаллических фаз. Так при ЛЭНП сплавом типа FeCrPC сплав 5 табл. 2 в покрытии появляется α-твердый раствор на основе железа. Кроме того, за короткое время, в течение которого расплавляется металл при ЭЛАНП не успевает пройти гомогенизация состава всего расплавленного объема, в легированный слой попадают и недорасплавившиеся частицы - продукты механического разрушения анода.

Механические продольно-крутильные колебания воздействуют на обрабатываемую поверхность подложки, как удар со сдвигом. При поглощении акустической энергии образуются новые дислокации, растет их плотность, происходит активация малоподвижных дислокаций, разориентация субзерен и разрушение субграниц, образование ячеистой структуры, двойникование и образование других структурных несовершенств. Рекристаллизационные процессы в таком материале, приводят к образованию более мелкого зерна, что обусловлено более высокой скоростью образования зародышей, по сравнению со скоростью их роста, что предопределяет его сохранение в конечной структуре электроакустических покрытий. Кроме того, УЗК воздействуют на микросварочную ванну, возникающую при формировании покрытия, изменяя структуру самого покрытия, а также его физико-механические свойства [5-11].

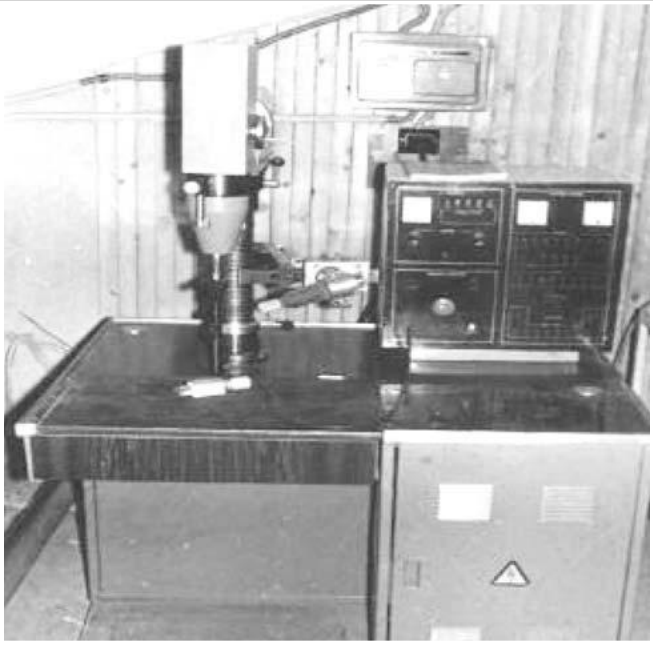


Рис. 2. Внешний вид и установка «ЭЛАН-3»

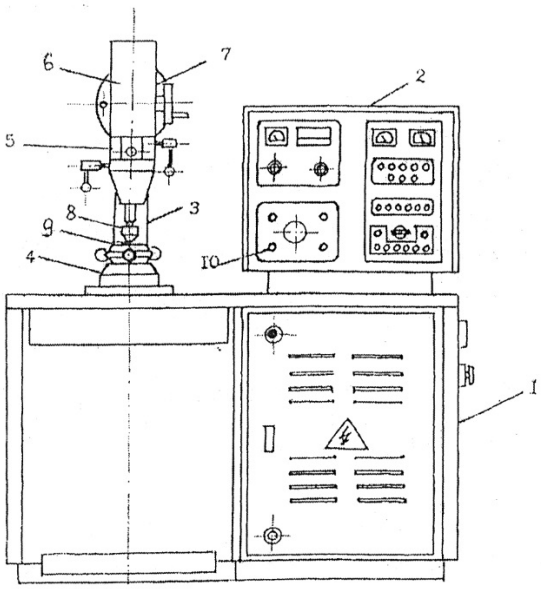


Рис. 3. Схема установки «ЭЛАН-3»:
1 – станина; 2 – пульт управления; 3 – колонна; 4 – опора; 5 – каретка; 6 – головка ультразвуковая; 7 – план шайба; 8 – патрон; 9 – электрод; 10 – гнездо однополюсной вилки

По данным рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализа (РСМД) на поверхности стали появляются два твердых раствора на основе α- и γ- Fe и аморфная фаза с высокой химической неоднородностью слоя. На рентгенограммах полученных покрытий на фоне размытых диффузных максимумов интенсивности рассеяния рентгеновских лучей наблюдаются дифракционные отражения, соответствующие кристаллическим фазам. Применение метода косых рентгеновских съемок обнаружило на поверхности электроакустического слоя присутствие аморфной состав-

ляющей. Присутствие аморфных фаз также подтверждается методом (просвечивающей электронной микроскопии от тонких фольг, полученных электрохимической полировкой.

После полного химического растворения стали (подложки) и частичного растравливания «белого» слоя на отдельных микродифракционных картинах отсутствуют четкие дифракционные максимумы. Наблюдается лишь достаточно интенсивное размытое кольцо вокруг неотклоненного пучка электронов, а также второе и третье еще более размытые кольца значительно меньшей интенсивности, что характерно для аморфных материалов. Количество аморфной фазы увеличивается при увеличении энергии разряда (номера режима). С его увеличением возрастает износ и коррозионная стойкость. Последняя измерялась весовым способом в азотной кислоте. Анализ поверхности стали после коррозионных испытаний показывает, что раствор образцов идет, в основном, по участкам стали, не покрытых электроакустическим слоем, оставляя участки, упрочненные легированием, практически без изменений. При отжигах в диапазоне 200…700 °С через 100 °С 0,3 час. внешний вид слоя не изменяется (частично протравливается он только после отжига при 700 °С, микротвердость при этом мало изменяется. Рентгенографически отмечается распад аморфной фазы выше 300 °С и распад метастабильных твердых растворов на основе α- и γ-Fe в интервале температур 200…400 °С и 500…00 °С соответственно. При электрохимических испытаниях установлено, что после распада аморфной фазы и пересыщенного твердого раствора на анодной поляризационной кривой сплава с покрытием, наблюдается резкое повышение тока активного растворения. Коррозионная стойкость слоя после распада метастабильных фаз снижается, однако остается выше, чем у стали 30ХГСА.

На основании результатов триботехнических испытаний в условиях возвратно-поступательного движения установлено, что аморфизированные покрытия из сплавов на основе железа и никеля по износостойкости конструкционные и инструментальные стали после термо- и химикотермической обработки.

Так, например, при исследовании на оптимизированном режиме [15, 16, 18] электроакустических покрытий из сплавов сплав 1 и сплав 2 (табл. 1) с аморфнокристаллической структурой на машине торцевого трения без смазки они показали в 2…3 раза меньшие значения линейного износа по сравнению с цианированной сталью 30ХГСА,

Таким образом, проведенные исследования подтверждают эффективность использования эвтектических сплавов на железо-никелевой основе для получения аморфно-кристаллических электроакустических покрытий с повышенной износо- и коррозионной стойкостью.

Одним из недостатков электроакустических покрытий является недостаточно высокое качество поверхности R_a= 1…3 мкм, высокая пористость до (6…8) %, значительные внутренние напряжения и низкая адгезия к металлическому изделию, что сужает применение таких композитов. Одним из путей повышения качества и свойств электроакустических покры-

тий является применение лазерной и финишной обработки. В частности, в качестве финишной обработке предлагается выглаживание синтетическим алмазом и минералокерамикой [13, 14, 35, 36].

Полученные результаты могут быть полезны при создании ресурсосберегающих технологий обработки конструкционных и инструментальных сталей с применением новых нанокомпозиционных покрытий и смазок [37-57].

Работа подготовлена в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России №11.6682.2017/8.9.

Список литературы

1. Гадалов В.Н., Захаров И.С. Реновация - системная деятельность к возрождению средств материального производства // Материалы и упрочняющие технологии 2003. Сб. Материалов X юбилейной Российской НТК с международным участием. Курск: КГТУ. 2003. Ч. 1. С. 8-11.

2. Гадалов В.Н., Захаров И.С. К вопросу о применении методов поверхностного упрочнения конструкционных и инструментальных материалов в современных условиях // Материалы и упрочняющие технологии – 2004 // Сб. Материалов XI Российской НТК. Курск: КГТУ. 2004. С. 8-12.

3. Аграната Б.А. Ультразвуковая технология. М.: Металлургия. 1974. 504 с.

4. Минаков В.С., Кочетов А.Н. Электроакустическое напыление // СТИН. 2003. С. 32-35.

5. Абрамов О.В. Кристаллизация металлов в ультразвуковом поле. М.: Металлургия. 1972. 256 с.

6. Гаврилова Т.М., Терехин Г.Е., Шевченко О.И. Геометрические параметры и структура наплавленного в ультразвуковом поле слоя // Известия вузов. Черная металлургия, 2001. № 6. С. 39-41.

7. Гаврилова Т.М., Шевченко О.И., Терехин Г.Е. Особенности воздействия ультразвуковых волн на микроструктуру наплавленных покрытий // Современные технологии материаловедения. Магнитогорск: МГТУ. 2003. С. 76-80.

8. Гадалов В.Н., Рощупкин В.М., Павлов Е.В. Разработка технологии и исследование высокоэффективных электроакустических покрытий из жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС многоцелевого назначения // Славяновские чтения: труды межд. НТК. Липецк: ЛГТУ, 2004. Книга 1. С. 268-276.

9. Аль-Тибби В.Х., Минаков В.С., Димочкин Д.Д. Получение наноструктурных материалов методом электроакустического напыления // СТИН. 2007. №4. С. 28-32.

10. Кручинин А.М., Захаревич Е.Е., Батаев И.А. Восстановление валов электрических машин с использованием технологии наплавки и ультразвуковой обработки покрытий // Материаловедение. 2008. №3. С. 245-49.

11. Гадалов В.Н., Емельянов С.Г., Романенко Д.Н. Применение электроакустического напыления для упрочнения и восстановления деталей машин и инструмента // Киев: Сварщик. 2008. №1(59). С. 26-29.

12. Гадалов В.Н., Абашкин Р.Е., Балабаева Е.Ф. Электроакустическое нанесение покрытий прогрессивная технология для упрочнения и восстановления деталей машин и инструмента // Материалы и упрочняющие технологии - 2008. Курск: КГТУ. 2008. Ч. 1. С. 48-62.

13. Гадалов В.Н., Романенко Д.Н. Упрочнение и восстановление деталей электроакустическим напылением самофлюсующихся сплавами на никелевой и железной основе // Материалы и упрочняющие технологии – 2011. Курск: ЮЗГУ. 2011. С. 28-41.

14. Гадалов В.Н., Сольников В.Г., Агеев Е.В. Металлография металлов, порошковых материалов и покрытий, полученных электроискровыми способами. Установка ЭЛАН-3. М.: ИНФРА-М. 2011. 468 с.

15. Гадалов В.Н., Сальников В.Г., Романенко Д.Н. Структурнофазовое состояние, свойства электроакустического покрытия после выглаживания минералокерамикой // Известия ЮЗГУ. Курск. 2012. №1. С. 107-113.

16. Гадалов В.Н., Бредихина О.А., Тураева О.А. Вопросы оптимизации технологического процесса нанесения экологических электроакустических покрытий, их структура и свойства // Материалы и упрочняющие технологии – 2014. Курск: Юго-западный государственный университет, 2014. С. 149-155.

17. Гадалов В.Н., Романенко А.Г., Абакумов А.В. Применение, оптимизация процесса электроакустического нанесения покрытий для повышения эксплуатационных свойств композита из жаропрочных сплавов на никелевой основе // Сб. статей межд. НТК «Современные проблемы машиностроения». Томск: ТГУ. 2014. С. 204-209.

18. Гадалов В.Н., Филонович А.В., Ворначева И.В. Тонкая структура и долговечность монокристаллов алюминия при ультразвуковом воздействии // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. №8(140). С. 3-6.

19. Гадалов В.Н., Емельянов С.Г., Сафонов С.В. Оптимизация электроакустического нанесения покрытий для повышения эксплуатационных свойств композитов из жаропрочных сплавов на основе никеля // Вестник машиностроения. 2017. №6. С. 7-9.

20. Ковнеристый Ю.К. Объемно-аморфизирующие металлические сплавы и наноструктурные материалы на их основе // МИТОМ, 2005. С. 55-61.

21. Лякишев Н.П., Алымов М.И. Наноматериалы конструкционного назначения // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1. №1-2. С. 71-81.

22. Гадалов В.Н., Захаров И.С. Метастабильные металлические наносистемы // Материалы и упрочняющие технологии – 2006. Курск, 2006. Ч. 1. С. 8-11.

23. Гадалов В.Н., Емельянов С.Г. Некоторые аспекты разработки наноматериалов и нанотехнологии // Материалы и упрочняющие технологии – 2007. Курск, 2007. Ч. 1. С. 4-7.

24. Коротаев Д.Н. Технологические возможности формирования износостойких наноструктур электроискрвым легированием. Омск: СибАДИ. 2009. 254 с.

25. Уильямс Л., Адаме У. Нанотехнологии без тайн. М.: Эксмо. 2009. 368 с.

26. Балакирев В.Ф., Крымский В.В., Кулаков Б.А. Электроимпульсные нанотехнологии; под ред. Л.А. Смирнова. Екатеринбург: Уро РАН. 2009. 141 с.

27. Пячин С.А., Заводинский В.Г., Кузьменко А.П. Поверхностное структурирование меди под действием электрического разряда // Письма ЖТФ. 2010. 36 (14). С. 34-40.

28. Кузьменко А.П., Николенко С.В., Пячин С.А. Наноструктурированные электроискровые покрытия // Фрязино. VII Международная НТК «Нанотехнологии производства» 2010. Фрязино. 2010. С. 148-149.

29. Николенко С.В., Кузьменко А.П., Тимаков Д.И. Наноструктурирование поверхности стали электроискровой обработкой новыми электродными материалами на основе карбида вольфрама // Электронная обработка материалов. 2011. С. 28-35.

30. Гадалов В.Н., Сафонов С.В., Розина Т.Н. Применение аморфной матрицы в качестве основы для композиционного материала (вопросы образования и его характеристики) // Техника и технологии: Пути инновационного развития. Курск. 2014. С. 70-73.

31. Гадалов В.Н., Пеньков В.Б., Скрипкин Ю.В. Исследование литых аморфных сплавов системы Zi-Cu-Ni-Al-Ti // Физика и технология наноматериалов и структур. Курск: ЗАО «Университетская книга». 2015. С. 123-126.

32. Гадалов В.Н., Емельянов С.Г., Игнатенко Н.М. Электроискровое легирование поверхности сплавов на основе никеля и титана // Известия Юго-Западного государственного университета. Курск. 2016. №1(18). С. 9-20.

33. Гадалов В.Н., Гвоздев А.Е., Стариков Н.Е., Романенко Д.Н. Применение электроискрового легирования электродными материалами на основе карбида вольфрама для наноконстурирования поверхности стали 35 // Известия Тульского государственного университета. 2017. Вып. 11. Ч. 2. С. 97-113.

34. Гадало В.Н., Ворначева И.В., Филатов Е.А. Структурные особенности материалов // LAP LAMBERT Academic Publishing R. 2018. 119 p.

35. Гадалов В.Н., Емельянов С.Г., Филатов Е.А. Наноструктурирование поверхности стали при электроискровой обработке новыми электродными материалами на основе карбида вольфрама // Вестник машиностроения. 2018. №5. С. 52-57.

36. Гадалов В.Н., Емельянов С.Г., Филатов Е.А. Исследование субструктуры и свойств спеченного титанового сплава с электрофизическим покрытием, подвергнутым выглаживанию минералокерамикой // Упрочняющие технологии и материалы. 2017. Т. 13. №12(156). С. 568-571.

37. Бреки А.Д., Кольцова Т.С., Скворцова А.Н., Толочко О.В., Александров С.Е., Лисенков А.А., Провоторов Д.А., Сергеев Н.Н., Малий Д.В., Сергеев А.Н., Агеев Е.В., Гвоздев А.Е. Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе алюминия, упрочненных углеродными нановолокнами, при трении по стали 12Х // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. № 4 (21). С. 11 – 23.

38. Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е. Пластическая дилатансия и деформационная повреждаемость металлов и сплавов: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 114 с.

39. Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е. Обработка сталей и сплавов в интервале температур фазовых превращений: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 320 с.

40. Медведева В.В., Бреки А.Д., Крылов Н.А., Фадин Ю.А., Стариков Н.Е., Гвоздев А.Е., Александров С.Е., Сергеев А.Н., Провоторов Д.А., Малий Д.В. Исследование изнашивания стали ШХ15 в среде пластичных смазочных композиционных материалов, содержащих дисперсные частицы слоистого модификатора трения // Технология металлов. 2016. № 7. С. 9 – 15.

41. Бреки А.Д., Диденко А.Л., Кудрявцев В.В., Васильева Е.С., Толочко О.В., Гвоздев А.Е., Сергеев Н.Н., Провоторов Д.А., Стариков Н.Е., Фадин Ю.А., Колмаков А.Г. Композиционные покрытия на основе полиимида А-ООО и наночастиц WS_2 с повышенными триботехническими характеристиками в условиях сухого трения скольжения // Материаловедение. 2016. № 5. С. 41 – 44.

42. Кондрашина А.В., Кузовлева О.В., Гвоздев А.Е. Деформация, структурообразование и разрушение стали Р6М5 // Деформация и разрушение материалов. 2007. № 8. С. 11 – 16.

43. Кузовлева О.В., Гвоздев А.Е. О закономерностях и причинах изменения пластичности металлов и сплавов в состоянии предпревращения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Вып. 5. Ч. 3. С. 94 – 103.

44. Макаров Э.С., Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М. Теория пластичности дилатирующих сред: монография; под. ред. проф. А.Е. Гвоздева. 2-е изд. перераб. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 337 с.

45. Гвоздев А.Е., Колмаков А.Г., Кузовлева О.В., Сергеев Н.Н., Тихонова И.В. Механические свойства конструкционных и инструментальных сталей в состоянии предпревращения при термомеханическом воздействии // Деформация и разрушение материалов. 2013. № 11. С. 39 – 42.

46. Селедкин Е.М., Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е., Сергеев Н.Н., Калинин А.А., Малий Д.В. Моделирование ресурсосберегающих процессов обработки металлов и сплавов: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 204 с.

47. Гвоздев А.Е., Колмаков А.Г., Боголюбова Д.Н., Сергеев Н.Н., Тихонова И.В., Провоторов Д.А. Особенности протекания процессов разупрочнения при горячей деформации алюминия, меди и их сплавов // Материаловедение. 2014. № 76. С. 48 – 55.

48. Гвоздев А.Е., Сергеев Н.Н., Минаев И.В., Колмаков А.Г., Тихонова И.В., Сергеев А.Н., Провоторов Д.А., Хонелидзе Д.М., Малий Д.В., Голышев И.В. Распределение температур и структура в зоне термического влияния для стальных листов после лазерной резки // Материаловедение. 2016. № 9. С. 3 – 7.

49. Шоршоров М.Х., Гвоздев А.Е., Афанаскин А.В., Гвоздев Е.А. Расчет кластерной структуры расплава, ее влияние на образование наноаморфных твердых фаз и их структурную релаксацию при последующем нагреве // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 6. С. 12 – 16.

50. Шоршоров М.Х., Гвоздев А.Е., Головин С.А. Условия проявления сверхпластичности порошковых быстрорежущих сталей // Материаловедение. 1998. № 6. С. 42 – 47.

51. Gvozdev A.E., Minaev I.V., Sergeev N.N., Kolmakov A.G., Provotorov D.A., Tikhonova I.V. Grain size effect of austenite on the kinetics of pearlite transformation in low-and medium-carbon low-alloy steels // Inorganic Materials: Applied Research. 2015. Т. 6. № 1. P. 41 – 44.

52. Gvozdev A.E. Alternative technology of thermomechanical treatment of high-speed tungsten-molybdenum steel R6M5 // Metal Science and Heat Treatment. 2005. Т. 47. № 11-12. P. 556 – 559.

53. Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Minaev I.V., Tikhonova I.V. Role of nucleation in the development of first-order phase transformations // Inorganic Materials: Applied Research, 2015. Vol. 6. №4. P. 283 – 288.

54. Калинин М.М., Калинин А.М., Калинин А.А., Гвоздев А.Е. Изобретательство, экология, ресурсосбережение: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 494 с.

55. Breki A.D., Aleksandrov S.E., Tyurikov K.S., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Kalinin A.A. Antifriction properties of plasma-chemical coatings based on SIO2 with MOS2 nanoparticles under conditions of spinning friction on SHKH15 steel // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. Т. 9. № 4. P. 714-718.

56. Селедкин Е.М., Гвоздев А.Е., Сергеев А.Н., Стариков Н.Е., Калинин А.А. Расчет процессов обработки материалов давлением методом конечных элементов: монография. Тула: Издательство ТулГУ, 2016. 113 с.

57. Гвоздев А.Е. Экстремальные эффекты прочности и пластичности в металлических высоколегированных слитковых и порошковых системах: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 476 с.

Гадалов Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Gadalov-VN@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Гвоздев Александр Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, gwozdew.alexandr2013@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Петренко Владимир Романович, д-р техн. наук, профессор, gwozdew.alexandr2013@yandex.ru, Россия, Воронеж, Воронежский государственный технический университет,

Иванов Александр Андреевич, аспирант, alekzenderroll@gmail.com, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Филонович Александр Владимирович, д-р техн. наук, профессор, filon8@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Калинин Антон Алексеевич, инженер, antony_ak@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Макарова Ирина Александровна, аспирант, makarova.mia@yandex.ru. Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет

STRENGTHENING AND RESTORATION OF PARTS FOR MACHINES AND MECHANISMS BY ELECTRO-ACOUSTIC SPRAYING WITH A MIXTURE OF SELF-FLUXABLE ALLOYS ON NICKEL AND IRON BASES

V.N. Gadalov, A.E. Gvozdev, V.R. Petrenko, A.A. Ivanov, A.V. Filonovich, A.A. Kalinin, I.A. Makarova

The issues of renovation and its tasks in modern industrial production are considered. It has been shown that electro-acoustic coating using a mixture of self-fluxing alloys based on nickel and iron is a progressive technology for hardening and restoration of machine parts and tools. The considered possibilities and development prospects of this technology with subsequent processing of electro-acoustic coatings by surface plastic deformation (smoothing) or laser irradiation.

Key words: electro-acoustic coating (ELANP), smoothing, laser processing (LO), electrode materials - alloys on nickel (PG-10N-01) and iron (PG-FBH-2) bases, mixtures, indenter for smoothing, nanocrystalline and amorphous structures, phase composition, physical and mechanical properties, wear resistance, roughness.

Gadalov Vladimir Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, Gadalov-VN@yandex.ru, Russia, Kursk, Southwestern State University,

Petrenko Vladimir Romanovich, doctor of technical sciences, professor, gwozdew.alexandr2013@yandex.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University,

Ivanov Alexander Andreevich, postgraduate, alekzenderroll@gmail.com, Russia, Kursk, Southwestern State University,

Filonovich Alexander Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, filon8@yandex.ru, Russia, Kursk, Southwestern State University,

Makarova Irina Aleksandrovna, postgraduate, makarova.mia@yandex.ru, Russia, Kursk, Southwestern State University

УДК 624.014

МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ТРЕЩИНЫ В ОБЛАСТИ КОНЦЕНТРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ

С.А. Соколов, Д.Е. Тулин

Предложена аналитическая методика вычисления коэффициента интенсивности напряжений для трещины, расположенной в зоне концентрации напряжений в элементе металлической конструкции. Исходными данными для этого расчета являются максимальные конструктивные напряжения в концентраторе, вычисляемые методом конечных элементов со сравнительно крупной сеткой и без моделирования трещины.

Ключевые слова: металлическая конструкция, коэффициент интенсивности напряжений, концентрация напряжений, конструктивные напряжения, трещина.

Широкое внедрение в инженерную практику конечно-элементных расчетов существенно повысило адекватность прогнозирования поведения металлических конструкций машин в условиях эксплуатации. Стало возможным учитывать упругопластические свойства материала, анализировать нелинейные процессы деформирования в сложных упругих системах, моделировать остаточные напряжения и многое другое. В том числе появились условия для использования методов механики разрушения для анализа прочности и долговечности объектов сложной конфигурации.

Для оценки возможности хрупкого разрушения или определения запаса циклической трещиностойкости конструкции при проектировании исследуют поведение трещины, которая может появиться в наиболее нагруженных узлах конструкции [1,2,3]. Для этого в различные узлы условно вводят модельную трещину, которая моделирует дефект сварного соединения или усталостное повреждение. Таким образом, трещина всегда оказывается в области концентратора напряжений. Для анализа поведения этой трещины необходимо определить расчетные значения критериев механики разрушения [4, 5].

Метод конечных элементов дает возможность вычисления коэффициента интенсивности напряжений, J-интеграла или раскрытия вершины трещины [6 - 8]. Однако для прямого определения этих величин требуется моделирование трещины и весьма детальный анализ локального напряженного состояния в области ее вершины. Это весьма неудобно при проектировании крупных конструкций, так как значительно усложняет и утяжеляет модель зонами мелкой сетки. Поэтому во многих случаях, получив общее напряженное состояние конструкции, рассчитывают критерии механики разрушения, используя известные решения для коэффициента интенсивности напряжений (КИН) [7, 9]. В типовом случае КИН вычисляется как

$$K_{\mathrm{I}} = \xi_K \sigma_b \sqrt{\pi a}\,. \qquad (1)$$

где σ_b – напряжение брутто в расчетном элементе с трещиной; ξ_K – *K*-тарировка; *a* – характерный размер трещины. Некоторое количество решений для вычисления *K*-тарировки для трещин в области концентрации напряжений рассмотрено в указанных публикациях. Однако разнообразие форм сварных машиностроительных и строительных конструкций, выходит далеко за пределы типовых решений. Поэтому определение КИН для трещины в области концентрации напряжений для проектного расчета пока остается проблемой.

Напряженное состояние элемента конструкции с концентратором представляет собой довольно сложное поле, которое может быть смоделировано с разной степенью детализации. Можно выделить три условных уровня детализации:

а) Номинальное напряженное состояние конструкций σ_n, которое зависит от ее конфигурации, проектных размеров, условий опирания и нагружения. Этот уровень детализации реализуется, например, методами технической теории стержней или МКЭ по моделям из стержневых элементов.

б) Конструктивными напряжениями σ_s называют поле повышенных напряжений, возникающих в области крупномасштабной концентрации напряжений [10, 11]. Они обусловлены формой узлов конструкции, размерами присоединенных элементов (накладок, ребер, фланцев и пр.). Конструктивные напряжения не зависят от конфигурации и качества сварных швов.

в) Поле локальных напряжений σ_l связано с мелкомасштабной концентрацией напряжений обусловленной конфигурацией вершины концентратора, в частности, формой сварного шва. Этот уровень детализации напряженного состояния в инженерных расчетах машиностроительных конструкций не используется.

Напряженное состояние реальной конструкции, естественно, представляет собой единое поле, а представленная классификация относится к методам их моделирования. Для анализа поля конструктивных напряжений на стадии проектирования используют конечно-элементные модели с твердотельными или пластинчатыми элементами размер которых составляет $D_e = (1 \div 2)t$ (t – толщина элемента конструкции). Такой размер элементов позволяет оценить крупномасштабную концентрацию, и не чувствителен к локальным особенностям узла. Моделирование напряженного состояния на уровне локальных напряжений не имеет смысла для проектной практики, так как геометрические параметры сварных швов, определяющие этот уровень напряжений, имеют вероятностную природу. Характеристики распределений вероятности размеров катетов, усилений швов, подрезов и пр. в проектируемой конструкции не известны и учет влияния этих величин выходит за рамки проектного расчета.

Целью данной работы является методика вычисления КИН для трещины нормального отрыва (K_{I}), находящейся в области концентрации напряжений в элементе конструкции, с использованием конструктивных напряжений.

Геометрические концентраторы можно разделить на три типа: отверстия, вырезы и уступы (рис. 1, а). В подавляющем большинстве случаев узлы сварных конструкций являются концентраторами типа уступ (рис. 1, б, в, г, д). Поэтому в данной работе рассматриваются трещины в концентраторе типа уступ, образованном пластинчатыми конструктивными элементами. Трещины могут быть трех видов: краевая, поверхностная полуэллиптическая и сквозная.

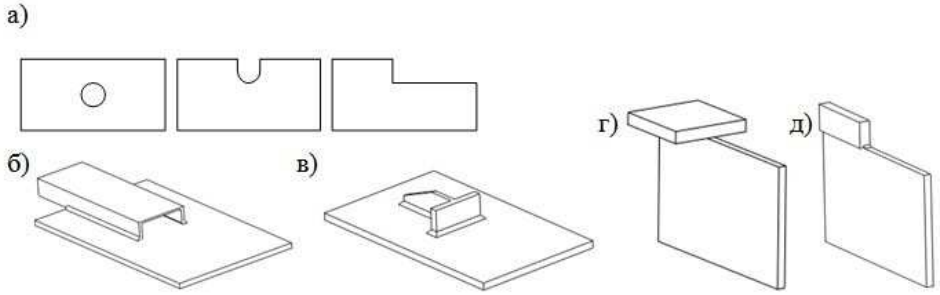


Рис. 1. Схемы концентраторов

Положим, что надо проанализировать надежность конструкции при возникновении трещины в некотором элементе с концентратором напряжений (рис. 2, а). Анализ напряженного состояния конструкции выполняется на уровне конструктивного напряжения. Для этого используется конечно-элементная модель из элементов с размером $D_e = (1 \div 2)t$ без моделирования трещины. С целью вычисления КИН для модельной трещины целесообразно использовать напряжения σ_D в наиболее нагруженном конечном элементе, расположенном в концентраторе (рис. 2, б, затененный элемент). Тогда выражение для КИН запишется как

$$K_{\mathrm{I}} = \xi_K k_D \sigma_D \sqrt{\pi a}\,. \qquad (2)$$

где ξ_K – *K*-тарировка для такой же трещины в гладкой пластине без уступа (рис. 2, в); k_D – безразмерный коэффициент, учитывающий особенности напряженного состояния в районе концентратора.

Значение ξ_K для различных трещин в гладкой полосе приведены в справочнике [9].

Для обоснования коэффициента k_D была выполнена серия конечно-элементных расчетов моделей, в которых трещина располагалась у основания уступа. Модели типа А имели краевую трещину в концентраторе, представляющем собой фасонку на кромке листа (рис. 3, а). В моделях типа Б рассматривались два варианта трещины, поверхностная полуэллиптическая или сквозная трещина, которые находилась около окончания про-

дольного ребра (рис. 3, б). Размеры моделей приведены в табл. 1. Полуэллиптические трещины имели отношение b/a = 1,5, что характерно для усталостных трещин. Окончание ребра было прямое или с уклоном 45 градусов. Модели для вычисления КИН строились из пластинчатых (модели А1, А2) или твердотельных конечных элементов (модели А3, Б1, Б2, Б3), размер которых в области вершины трещины составлял не более 0,2 мм. Значения КИН K_I для трещины в концентраторе вычислялись двумя способами, по напряжениям и по перемещениям берегов трещины [6]. В качестве расчетного КИН принималось среднее значение. КИН для полуэллиптических трещин определялся в наиболее глубокой точке фронта. Таким образом, был получен массив значений КИН для трещин в разных концентраторах.

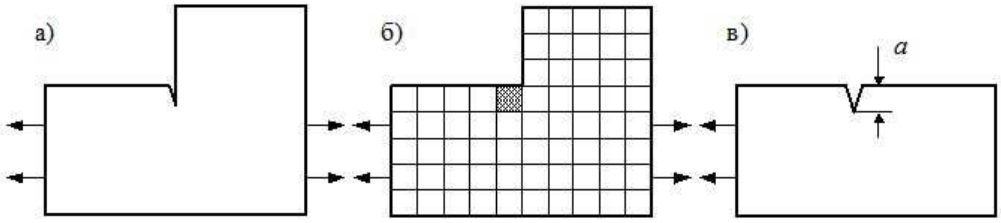


Рис. 2. Схемы к вычислению КИН для трещины в концентраторе

Параметры моделей

Индекс модели (тип и номер)	Толщины, мм		Уклон уступа, °	Размеры трещин, a или a/b, мм	Тип трещины
	t	t_1			
А1	20	20	90	5, 10, 20, 34	Краевая
А2	20	30	90	5, 10, 20, 34	Краевая
А3	20	20	90	10, 20, 40	Краевая
Б1	30	20	90	8/12 и 12/18	Полуэллиптическая
Б2	30	20	45	8/12 и 12/18	Полуэллиптическая
Б3	20	20	90	20, 30, 40	Сквозная

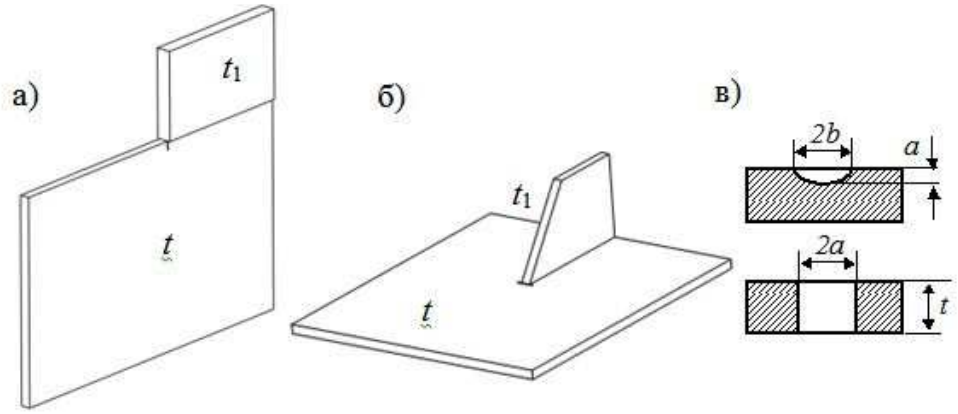


Рис. 3. Модели концентраторов вариант А (а) и Б (б) и схемы полуэллиптической и сквозной трещины (в)

Далее были выполнены расчеты моделей аналогичной конфигурации, но без трещины, выполненных из элементов типа Plate с достаточно грубой разбивкой, характерной для инженерных проектных моделей. Раз-

меры конечных элементов в этих моделях составляли D_e = 10, 20, 30 и 40 мм. По результатам этих расчетов были найдены значения напряжений σ_D в области предполагаемой трещины (рис. 2).

Значения коэффициента k_D для каждого размера трещины с каждым размером конечного элемента были вычислены как

$$k_D = \frac{K_{\mathrm{I}}}{\xi_K \sigma_D \sqrt{\pi a}}.$$

В этом выражении значения ξ_K для трещины в пластине без концентраторов определялись по справочнику [9].

Результаты расчетов показаны в форме графиков зависимости $k_D = f\left(a/D_e\right)$ (рис. 4). Как видно из графиков результаты расчетов разделились на две группы, в одну из них входят результаты, полученные на моделях с краевой трещиной, в другую – на моделях с трещинами, расположенными в средней части пластины. Причем в моделях второй группы полуэллиптические трещины характеризуют начало развития усталостного повреждения, а сквозные трещины – его активную фазу с распространением трещины на существенную часть сечения. Промежуточная стадия развития трещины не моделировалась. Из графиков видно, что характер изменения величины k_D для малых поверхностных трещин отличается от того же процесса для сквозных трещин. Это связано с тем, что поверхностные трещины располагаются в поле напряжений концентратора, имеющем значительные градиенты, как по ширине, так и по толщине листа. Фронт сквозных трещин находился на большем расстоянии от концентратора, где градиент напряжений имеет существенно меньшее значение.

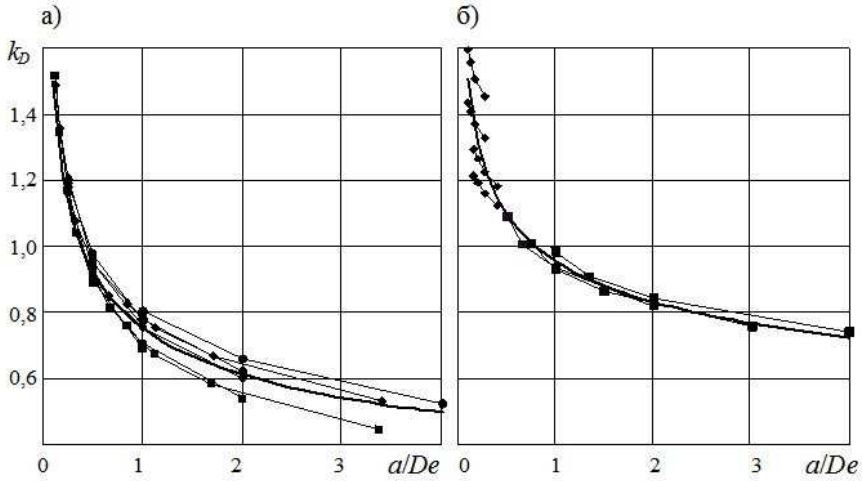


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента k_D от отношения a/De. а – модели А1 – ♦, А2 – ■ и А3 – •; б – модели Б1 и Б2 – ♦ и модель Б3 – ■

Как видно из обоих графиков, если размер конечного элемента в зоне концентрации напряжений примерно в два раза больше характерного размера трещины $D_e/a \approx 2$, то $k_D \approx 1$. То есть напряжение в наиболее

нагруженном элементе σ_D можно непосредственно использовать для вычисления КИН по базовому выражению (1) для трещины в гладкой пластине. В нем *K*-тарировка при $a/B < 0,2$ будет равна для краевой трещины ξ_K = 1,12, а для сквозной ξ_K = 1.

На основании полученных данных можно сформировать аппроксимирующие зависимости для вычисления КИН для трещин, расположенных в зонах концентрации напряжений. С учетом того, что данная методика базируется на использовании конструктивных напряжений, ее применение корректно для трещин с характерным размером $a \geq 0,5t$, которые малочувствительны к локальной геометрии концентратора. При $D_e/a = 0,25 \div 4,00$ коэффициент k_D можно вычислять по формулам:

– для краевых трещин:

$$k_D = 0,75\left(\frac{D_e}{a}\right)^{0,3}; \quad (3)$$

– для полуэллиптических поверхностных и сквозных трещин:

$$k_D = 0,95\left(\frac{D_e}{a}\right)^{0,2}. \quad (4)$$

Эти зависимости показаны сплошными линиями на графиках (рис. 4). Отклонение расчетных точек от аппроксимирующей зависимости в указанном диапазоне не превышает ±10%. Видно, что для краевой трещины связь $k_D = f\left(a/D_e\right)$ (3) достаточно устойчива в области весьма малых трещин. Это связано с тем, что при развитии этой трещины характер поля напряжений в ее вершине практически не меняется. Аналитическая зависимость (4) для малых поверхностных трещин дает существенно больший разброс, так как размеры этих трещин малы и их вершины находятся в непосредственной близости от концентратора. В этих моделях значительное влияние на трещину оказывает толщина ребра и форма его окончания, которые нивелируются в грубой модели из пластинчатых элементов. Однако для практических приложений наибольший интерес представляют трещины размером $a \geq 0,5t$. При используемых размерах конечных элементов D_e этому условию соответствует область $a/D_e \geq 0,3 \div 0,5$. То есть для поверхностных полуэллиптических трещин следует использовать специальное уточненное решение.

Заключение. В данной работе предложена аналитическая методика вычисления КИН для трещины, расположенной в зоне концентрации напряжений в элементе металлической конструкции. Исходными данными для этого расчета являются максимальные напряжения в концентраторе, полученные по конечно-элементной модели со сравнительно крупной сеткой и без моделирования трещины.

На основании анализа результатов серии конечно-элементных расчетов показано, что значение КИН может быть вычислено по выражению (2), в которое подставляется напряжение σ_D в наиболее нагруженном ко-

нечном элементе, а коэффициент k_D вычисляется по формулам (3) или (4). Данную методику целесообразно использовать на стадии проектирования конструкции при применении методов механики разрушения для проверки ее прочности и долговечности с учетом влияния возможных трещин или трещиноподобных дефектов.

Список литературы

1. Hobbacher A.F. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. Second Edition. IIW. Springer, 2016. 145 p.

2. Sonsino C. M. Principles of local stress concepts for the assessment of welded joints // ESIS Newsletter. 2009. №45. P. 30 – 33.

3. Винокуров В.А., Куркин С.А., Николаев Г.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности; под ред. Б.Е.Патона. М.: Машиностроение, 1996. 576 с.

4. Доронин С.В., Лепихин А.М., Москвичев В.В., Шохин Ю.И. Моделирование прочности и разрушения несущих конструкций технических систем. Новосибирск: Наука, 2005. 250 с.

5. Соколов С.А., Грачев А.А., Васильев И.А. Анализ прочности элемента конструкции с трещиной в условиях отрицательных климатических температур // Вестник машиностроения, 2019. № 11. С. 42-46.

6. Вычислительные методы в механике разрушения: под ред. Атлури С. М.: Мир, 1990. 392 с.

7. Механика разрушения и прочность материалов: справочное пособие: под общей ред. Панасюка В.В. Киев: Наук. думка. 1988. Т. 2. 620 с.

8. Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. М.: Ленанд, 2008. 456 с.

9. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: под ред. Ю.Мураками. М.: Мир, 1990. 1016 с.

10. Radaj D., Sonsino C.M., Fricke W. Fatigue assessment of welded joints by local approaches. Second edition. Woodhead publ. lim. Cambridge Engl. 2006. 639 p.

11. Соколов С.А. Условие сопротивления усталости сварных узлов в форме локальных напряжений. М.: Вестник машиностроения, 2017. № 12. С. 14-19.

Соколов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, sokolov-sa@rambler.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Тулин Даниил Евгеньевич, аспирант, sokolov-sa@rambler.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

METHOD OF CALCULATING THE STRESS INTENSITY COEFFICIENT FOR CRACK IN THE FIELD OF STRESS CONCENTRATOR

S.A. Sokolov, D.E. Tulin

An analytical method is proposed for calculating the stress intensity factor for a crack located in the zone of stress concentration in a metal structure element. The initial data for this calculation are the maximum structural stresses in the concentrator, calculated by the finite element method with a relatively large grid and without crack modeling.

Key words: metal structure, stress intensity factor, stress concentration, structural stress, crack.

Sokolov Sergey Alekseevich, doctor of technical sciences, professor, sokolov-sa@rambler.ru, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great,

Tulin Daniil Evgenievich, postgraduate, sokolov-sa@rambler.ru, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great

УДК 621.919.02 (07)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРЕЗАЕМЫХ СЛОЕВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГРАННЫХ ПРОТЯЖЕК

В.В. Куц, В.С. Кочергин, М.С. Разумов

При проектировании режущей части протяжного инструмента для обработки гранной части отверстия наибольший интерес представляют задачи, связанные с расчётом периметра режущих зубьев и площади поперечного сечения среза, выбором схемы срезания припуска, подач на зуб и самой конструкции протяжки. Расчёт величины периметра режущих зубьев является многовариантной, достаточно сложной задачей. В статье приведена методика определения величины периметра режущих зубьев от подъёма на зуб.

Ключевые слова: протягивание, подача на зуб, протяжка, методика.

Как следует из практики, наиболее эффективными, как с позиции технологичности, так и с позиции эксплуатационных свойств являются протяжки с генераторной схемой съёма припуска.

По мере перемещения протяжки через обрабатываемое отверстие суммарная площадь поперечного сечения слоёв, срезаемых всеми одновременно режущими зубьямиможет как возрастать, так и убывать, что негативно влияет на стабильность процесса протягивания и стойкость инструмента. Поэтому расчёт оптимальной величины периметра режущих зубьев является многовариантной задачей и представляет при конструировании определенную сложность.

Периметр резания зуба протяжки для обработки гранной части трехгранного, квадратного, шестигранного отверстия, как видно из схем, представленных на рис. 1, складывается из дуговых участков:

$$\begin{aligned} P_{\text{рез}} &= 6P_{\text{дуги}} \text{ – для трехгранного отверстия;} \\ P_{\text{рез}} &= 8P_{\text{дуги}} \text{ – для квадратного отверстия;} \\ P_{\text{рез}} &= 12P_{\text{дуги}} \text{ – для шестигранного отверстия.} \end{aligned} \quad (1)$$

Обобщая (1) получим

$$P_{\text{рез}} = 2 \cdot n \cdot P_{\text{дуги}}, \quad (2)$$

где n – количество граней протягиваемого отверстия.

Длина дугового участка определяется по зависимости:

$$P_{\text{дуги}} = \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_i\right) \cdot r_i, \tag{3}$$

где α_i – угловое положение точки начала дуги *i*-го зуба протяжки; r_i – текущее значение радиуса *i*-го зуба протяжки, мм.

Найдем текущее значение радиуса *i*-го зуба протяжки

$$r_i = r_0 + i \cdot S_z, \tag{4}$$

где r_0 – радиус вписанной окружности; S_z – величина подъёма на зуб.

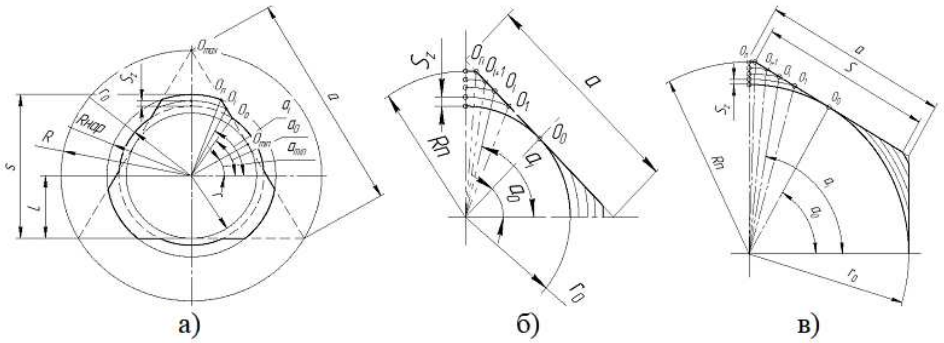


Рис. 1. Определение периметра резания гранного отверстия: а – трехгранного; б – квадратного; в – шестигранного

Угловое положение точки начала дуги *i*-го зуба протяжки определим, как

$$\alpha_i = \arccos\left(\frac{h_i}{r_i}\right), \tag{5}$$

где h_i – ширина участка дуг, которую определим путем решения относительно h_i уравнения

$$-\tan\left(\frac{\pi}{n}\right) \cdot h_i + r_n = \sqrt{r_i^2 + h_i^2}\,, \tag{6}$$

где r_n – радиус описанной окружности

$$r_n = \frac{a}{2\sin\left(\frac{\pi}{n}\right)}, \tag{7}$$

где a – ширина грани, которую можно определить через радиус вписанной окружности

$$a = 2r_0 \tan\left(\frac{\pi}{n}\right). \tag{8}$$

Окончательно получим

$$h_i = \cos\left(\frac{\pi}{n}\right) \cdot \left(r_n \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) - \sqrt{r_i^2 - r_n^2 \cos\left(\frac{\pi}{n}\right)^2}\right). \tag{9}$$

Если выражение для периметра (3) представить в виде функции

$$P_{\text{дуги}}(r)=\left(\frac{\pi}{2}-\alpha(r)\right)\cdot r\,, \tag{10}$$

где $\alpha(r)$ – функция для расчёта углового положения точки начала дуги при заданном значении радиуса r, значения которой вычисляются по выражению (5), то площадь поперечного сечения среза для i-го зуба определим, как

$$S_i=\int_{r_{i-1}}^{r_i} P_{\text{дуги}}(r)dr\,. \tag{11}$$

Рассмотрим пример расчёта параметров срезаемых слоев для каждого зуба гранной протяжки при числе граней равном 3, 4 и 6 и при $r_0=40$ мм, $r_n=45$ мм и $S_z=0{,}5$ мм. На рис. 2 показан результат геометрического моделирования срезаемых слоёв гранных протяжек.

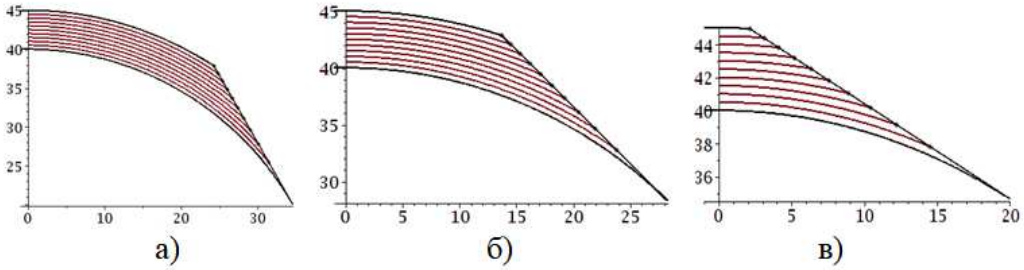


Рис. 2. Сечение срезаемых слоёв для протяжек: а – трёхгранной; б – квадратной; в – шестигранной

На рис. 3 показаны графики изменения периметра резания и площади поперечного сечения от радиуса дугового участка зубьев протяжки.

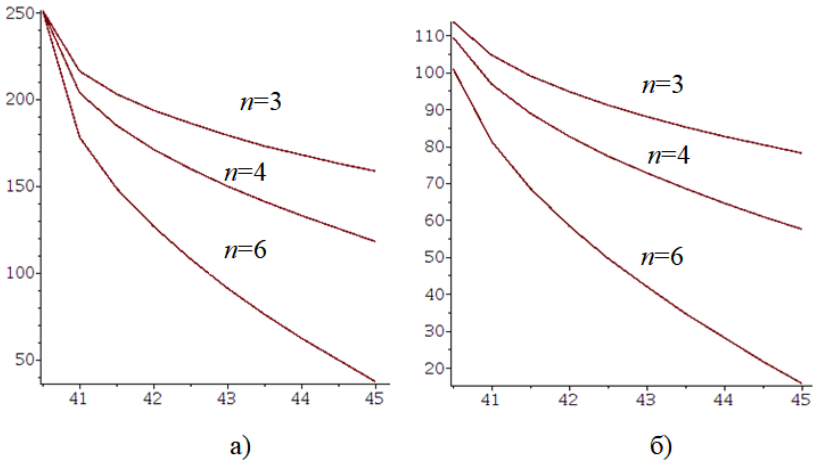


Рис. 3. Изменение параметров срезаемого слоя в зависимости от радиуса дугового участка зубьев протяжки (мм): а – периметра, мм; б – площади, мм^2

С использованием формулы (11) становится возможным решение задачи определения величин подъёма на зуб при условии обеспечения заданной величины площади поперечного сечения срезаемого слоя. При заданной величине площади поперечного сечения срезаемого слоя S, необходимо решить уравнение

$$S = \int_{r_i}^{r_i+S_{zi}} P_{\text{дуги}}(r)dr \qquad (12)$$

относительно параметра S_{zi}. На рис. 4 показан результат построения различных схем срезаемого слоя с использованием (12) для шестигранной протяжки, рассматриваемой в примере, при различных значениях величин площади поперечного сечения срезаемого слоя (5, 10 и 20 мм^2).

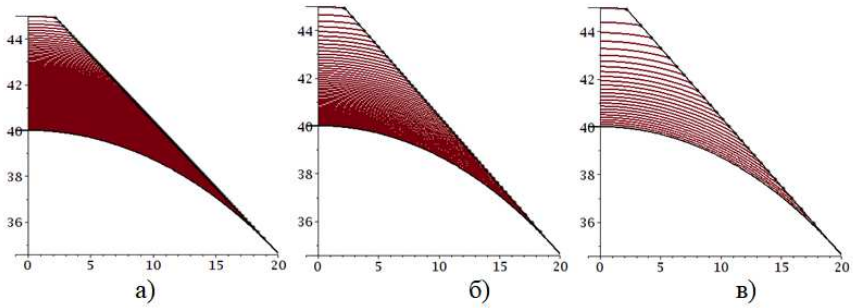


Рис. 4. Сечение срезаемых слоёв для шестигранной протяжки при: а – S=5 мм^2; б – S=10 мм^2; в – S=20 мм^2

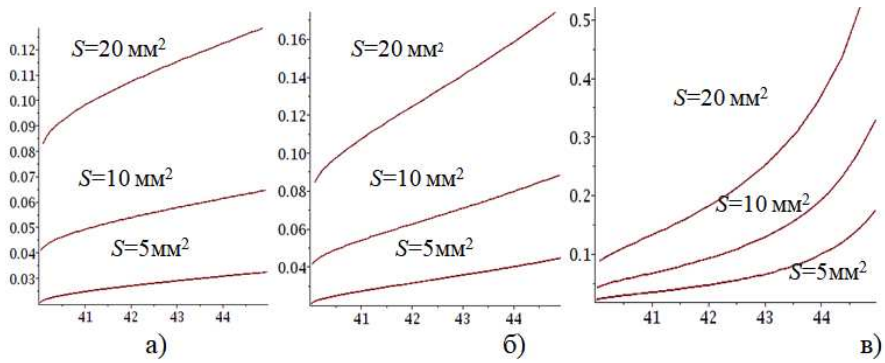


Рис. 5. Изменение величины подъёма на зуб (мм) в зависимости от радиуса дугового участка (мм) для протяжек: а – трёхгранной; б – квадратной; в – шестигранной

Были проведены расчёты подъёмов на зуб для всех рассматриваемых типов протяжек (трёхгранной, квадратной и шестигранной). На рис. 5 показана зависимость величины подъёма на зуб от радиуса дугового участка её зуба при различных значениях величин площади поперечного сечения срезаемого слоя (5, 10 и 20 мм^2).

Как видно из графиков (см. рис. 5), наибольший прирост величины подъёма на зуб соответствует шестигранной протяжке. С увеличением площади поперечного сечения срезаемого слоя также уменьшается требуемое количество зубьев протяжки (рис. 6).

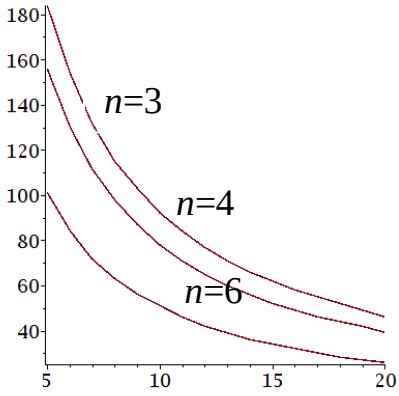


Рис. 6. Изменение числа зубьев протяжки в зависимости от заданной площади поперечного сечения срезаемого слоя (мм^2)

Зная характер изменения периметра резания ($P_{\text{рез}}$) и площади поперечного сечения от подъёма на зуб (S_z) и номера зуба, уже можно на следующем этапе проектирования переходить к исследованию изменения удельных и осевых сил резания, действующих на режущие громки протяжки. Однако, известные зависимости, для сил резания, приведенные в частности в работах [1-8] ограничены величинами подъёма на зуб до 0,2 мм, что ограничивает производительность проектируемого протяжного инструмента. Решение данной проблемы связано с применением схем протягивания с большими подъёмами на зуб от 0,2 до 0,5 мм [9], что требует дополнительных исследований сил резания при протягивании.

Список литературы

1. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.

2. Маргулис Д.К., Тверской М.М., Ашихмин В.Н. Протяжки для обработки отверстий. М.: Машиностроение, 1986. 232 с.

3. Емельянов С.Г., Кочергин В.С., Евсеев Е.Ю. Автоматизированный подход к проектированию протяжек для обработки гранных отверстий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. №5. С. 201 – 211.

4. Емельянов С.Г., Селезнёв Ю.Н., Рухлин А.С., Широконосов Ю.Г. Методика определения минимальной величины подъёма на зуб при протягивании из условия обеспечения допустимых удельных контактных нагрузок на передней поверхности режущих зубьев // Современные инструментальные системы. Курск: КГТУ, 2004. С. 104 – 108.

5. Селезнёв Ю.Н., Губанов В.С., Сергеев С.А. Автоматизированный расчет минимального подъема на зуб при протягивании // Современные инструментальные системы. Курск: КГТУ, 2005. С. 118 – 123.

6. Кочергин В.С. Теоретический анализ задач, связанных с проектированием эффективного протяжного инструмента с большими подачами для обработки гранных отверстий // Качество продукции:

контроль, управление, повышение, планирование. Сборник научных трудов 4-й Международной молодёжной научно-практической конференции. Курск, 2017. С. 312 – 314.

7. Проектирование и расчёт металлорежущего инструмента на ЭВМ: Учебное пособие для втузов / О.В. Таратынов, Г.Г. Земсков и др.; под ред. О.В. Таратынова. М.: Высшая школа, 1991. 423 с.

8. Промтов А.И., Зарак Т.В. Проектирование протяжек для обработки отверстий. Иргутск: ИрГТУ, 2007. 176 с.

9. Горецкая З.Д. Протягивание с большими подачами. М.: Машгиз. 1960. 204 с.

Куц Вадим Васильевич, д-р техн. наук, профессор, kuc-vadim@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Кочергин Виталий Сергеевич, аспирант, koshergin@mail.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Разумов Михаил Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, mika_1984_@mail.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE SHEAR LAYERS IN THE DESIGN FACET OF BROACHES

V.V. Kuts, V.S. Kochergin, M.S. Razumov

When designing the cutting part of a broaching tool for processing the facet part of the hole, the most interesting are the tasks associated with calculating the perimeter of the cutting teeth, with the choice of the scheme for cutting the allowance, feeds to the tooth and its design. Therefore, the calculation of the optimal perimeter of the cutting teeth is a multivariate task and represents a certain complexity in the design.The article provides a methodology for determining the dependence of the size of the perimeter of cutting on the rise on the tooth.

Key words: pulling, tooth feed, broaching, technique.

Kutz Vadim Vasilievich, doctor of technical sciences, professor, kuc-vadim@yandex.ru, Russia, Kursk, South Ural State University,

Kochergin Vitaly Sergeevich, postgraduate, koshergin@mail.ru, Russia, Kursk, South Ural State University,

Razumov Mikhail Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, mika_1984_@mail.ru, Russia, Kursk, South Ural State University

УДК 621.71

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСОВ-ОБОЛОЧЕК С РЕЗЬБОВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

Е.Н. Родионова

В настоящей статье рассматривается технология изготовления тонкостенных корпусов, применяемая в производстве действующего оборонного предприятия РФ. Описывается технология изготовления труб головной и хвостовой от операции заготовки до окончательной механической обработки, которые в дальнейшем свинчиваются с помощью специальной упорной резьбы.

Ключевые слова: технология изготовления, тонкостенные корпуса, специальная упорная резьба.

В рамках рабочей поездки в Тулу 03.02.2017 г. Министр обороны России генерал армии Сергей Шойгу посетил Научно-производственное объединение «Сплав», где проверил ход выполнения Государственного оборонного заказа и провел совещание с участием представителей Ростеха, руководства предприятия, Тульской области и органов военного управления.

На совещании глава военного ведомства заявил, что модернизация производства НПО «Сплав» не должна отразиться на качестве, объемах и сроках выполнения Гособоронзаказа. «Как я посмотрел, в цехах ведется монтаж нового оборудования, не останавливая производства. Наверное, так придется делать и дальше. Но, в связи с модернизацией производства, ни объемов, ни сроков мы пересматривать не будем», – сказал генерал армии Сергей Шойгу [1 - 3].

На производственных мощностях производят изделие «Град». Исходной заготовкой является труба размером 110×14 по ТУ 1308-005-33116077-2001 из конструкционной комплексно-легированной стали 12Х3ГНМФБА по ТУ 1308-001-49967239-98.

Технология производства обоих вариантов корпусов предусматривает следующие основные операции технологического процесса: отрезка, подрезка торцов, точение и растачивание фасок, обжим для образования технологической ступени, предварительную токарную обработку перед термообработкой, ротационная вытяжка, после чего выполняется ряд токарных операций.

Ниже рассмотрены начальная и конечная операции изготовления тонкостенных корпусов. Реактивный снаряд состоит из двух частей, заготовка представлена на рис. 1.

Для окончательной механической обработки применяются токарно-винторезные станки 1К62. После окончательной механической обработки корпуса выглядят, как показано на рис. 2.

Собранный готовый корпус реактивного снаряда представлен на рис. 3.

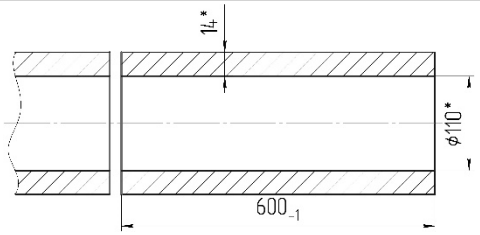
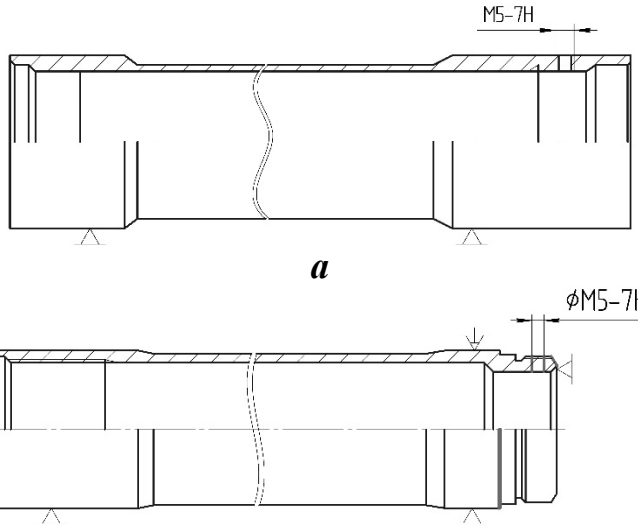


Рис. 1. Заготовка



а

б

Рис. 2. Составные части корпуса изделия «Град»: а – корпус головной части; б – корпус хвостовой части

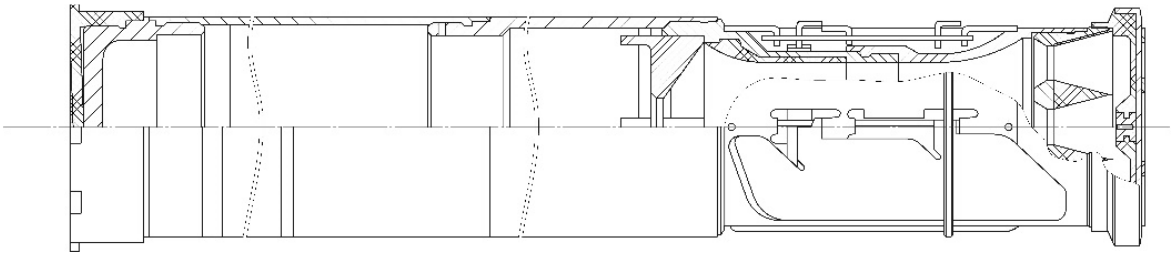


Рис. 3. Корпус реактивной части

Проанализировав технологию изготовления головной и хвостовой трубы двигателя, а также, учитывая проводимые ранее исследования в области ротационной вытяжки [4], можно предположить, что значительное влияние на точностные характеристики изделий оказывают наружные и внутренние диаметры, а также торцовое и радиальное биение заготовок.

Список литературы

1. Информационно - новостная система. Ракетная техника. [Электронный ресурс] URL: http://rbase.new-factoria.ru (дата обращения: 31.03.2020).

2. Military Informant. Военный Информатор. Основы военной доктрины. [Электронный ресурс] URL: http://military-informer.narod.ru (дата обращения: 31.03.2020).

3. Китайский Военный Форум [Электронный ресурс] URL: http://sinodefence.com (дата обращения: 31.03.2020).

4. Трегубов В.И. Ротационная вытяжка с утонением стенки цилиндрических деталей из труб на специализированном оборудовании: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2002. 148 с.

Родионова Елена Николаевна, главный метролог – начальник отдела, masik-ele@yandex.ru, Россия, Тула, АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева»

A STUDY OF THE BUILDINGS-SHELLS WITH THREADED CONNECTION

E.N. Rodionova

This article discusses the technology of manufacturing thin-walled enclosures used in the production of the current defense enterprise of the Russian Federation. The technology of manufacturing the head and tail pipes from the blank operation to the final machining, which are then screwed using a special thrust thread, is described.

Key words: manufacturing technology, thin-walled enclosures, special thrust thread.

Rodionova Elena Nikolaevna, chief metrologist-head of department, masik-ele@yandex.ru, Russia, Tula, JSC «NPO «SPLAV» they. A.N. Ganicheva»

УДК 621.914; 621.833

ОБРАБОТКА КРУГОВЫХ ЗУБЬЕВ ПАРЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЁС С ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ЗОНОЙ КАСАНИЯ

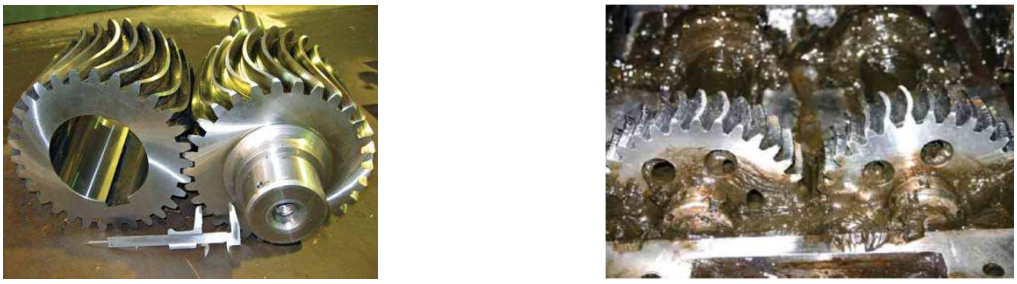
Д.Е. Бочкова, М.Н. Бобков, С.А. Золотова

Предложен новый способ обработки круговых зубьев пары цилиндрических колёс, обеспечивающий требуемую локализацию зоны касания зуба по его длине и высоте без применения инструмента с нестандартным производящим контуром. На основе способа и методик определения параметров станочных и рабочего зацеплений создан программный комплекс, позволяющий синтезировать параметры станочных зацеплений, наладок зубообрабатывающих станков и зуборезных инструментов, обеспечивающие требуемые размеры и расположение зоны касания зубьев в передаче.

Ключевые слова: цилиндрическая зубчатая передача, круговой зуб, зона касания зуба, приведённый зазор, линия уровня приведённых зазоров, станочное зацепление, компьютерная модель.

Существенное улучшение эксплуатационных характеристик тяжелонагруженных и высокоскоростных цилиндрических зубчатых передач может быть достигнуто за счёт применения колёс с круговыми зубьями. Благодаря увеличению коэффициента перекрытия и отсутствию осевой силы в зацеплении круговые зубья позволяют повысить плавность работы, снизить шум и вибрацию, упростить конструкцию подшипниковых узлов.

На рис. 1 представлены цилиндрические колёса с круговыми зубьями, изготовленные по заказу металлургического комбината ОАО “Северсталь” для редукторов листоупаковочных машин и листопрокатного стана. После двухлетнего периода эксплуатации работоспособность передач находилась на высоком уровне: передачи работали плавно и бесшумно, износ зубьев не наблюдался [1, 2].



а ***б***

Рис. 1. Колёса редукторов листопрокатного стана (а) и листоупаковочной машины (б)

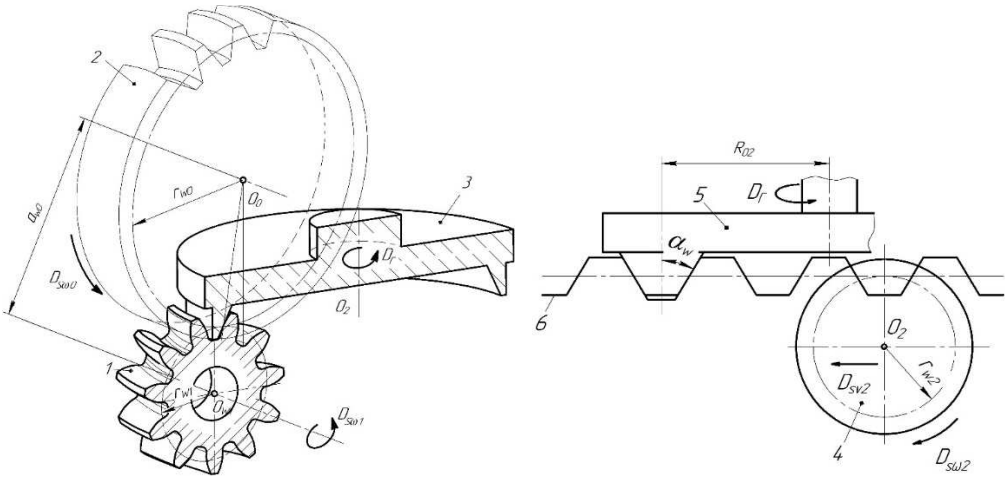
Как правило, цилиндрические зубчатые передачи рассчитывают в предположении, что оси колёс параллельны друг другу. На самом деле в результате сложения монтажных погрешностей положения осей в пространстве с упругими деформациями валов и других деталей будет иметь место перекос осей и, как следствие, кромочный контакт зубьев на их торцах и вершинах. Устранить опасность кромочного контакта в зацеплении и повысить прочность зубьев можно за счёт локализации зоны касания зуба по его длине и высоте путём совокупной профильной и продольной модификации зубьев [3, 4, 5, 6].

При изготовлении колёс с круговыми зубьями продольную модификацию зубьев можно получить сравнительно простым способом за счёт различия радиусов зуборезных головок, профилирующих сопряжённые стороны зубьев шестерни и колеса [7]. Профильную модификацию можно выполнить с помощью зуборезной головки с нестандартным профилем резцов, очерченным ломаной линией или прямой в сочетании с окружностью [3]. Однако это усложняет её проектирование, изготовление и эксплуатацию. Кроме того, для производства колёс с одинаковым модулем, но различными значениями коэффициента смещения исходного контура потребуется разный инструмент [8], что приведёт к ещё большему удорожанию производства.

Для локализации зоны касания по длине и высоте зубьев нами предлагается способ обработки [9, 10], при котором шестерню 1 обкатывают по производящему колесу 2 с впадинами, имеющими в среднем торцовом сечении трапецеидальный, а не эвольвентный профиль (рис. 2, а).

В процессе обработки зуборезной головке 3 сообщают главное движение D_{Γ} – вращение вокруг её оси, а заготовке – два вращательных движения $D_{s\omega 1}$ и $D_{s\omega 0}$ соответственно вокруг оси заготовки и оси произ-

водящего колеса, согласованных таким образом, что её начальный цилиндр с радиусом r_{w1} катится без скольжения по неподвижной центроиде – начальному цилиндру производящего колеса с радиусом r_{w0}.



а ***б***

Рис. 2. Схемы обработки зубьев шестерни и колеса

Зубья колеса 4 передачи (рис. 2, б) формируются резцами головки 5 при его обкате по производящей рейке 6, а значит, имеют в среднем сечении немодифицированный эвольвентный профиль. Таким образом, локализация зоны касания по высоте зуба происходит путём модификации профиля зубьев шестерни. Глубина модификации и, следовательно, высота зоны касания зуба определяются значением радиуса r_{w0} начальной окружности производящего колеса.

Одной из задач, стоящих при проектировании цилиндрических передач с круговыми зубьями, является определение границы зоны касания зубьев шестерни и колеса. Для этого можно воспользоваться методом [11], при котором рассматривают две взаимодействующие поверхности: модифицированную (фактическую) поверхность зуба шестерни и отсчётную теоретическую поверхность этого же зуба. Согласно стандарту [12] отсчётная теоретическая поверхность – это условная (воображаемая) поверхность, определяемая как огибающая номинальной поверхности зуба парного с ним колеса при их вращении. Поэтому, если зубья шестерни 1 (рис. 3) имеют продольную и профильную модификацию, боковая поверхность 2 её зуба будет отведена от отсчётной теоретической поверхности 3 при их касании в точке P – центре зоны касания.

Расстояние Δn между отсчётной теоретической поверхностью и модифицированной поверхностью зуба называется приведённым зазором [12], величина которого и определяет степень локализации контакта.

На боковой поверхности зуба шестерни расположены линии уровня 4, в точках которых приведённый зазор имеет постоянное значение. Установлено [11], что зона касания – это часть боковой поверхности зуба, ограниченная линией уровня, в точках которой выполняется условие

$$\Delta n = 0{,}006\sqrt{m_n}\,, \qquad (1)$$

где m_n – нормальный модуль.

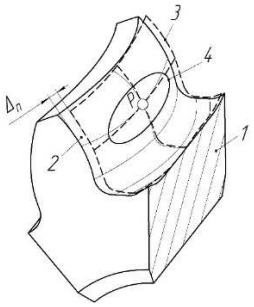


Рис. 3. Модифицированная и отсчётная теоретическая поверхности зуба шестерни

Поскольку в точках линии уровня приведённый зазор Δn имеет постоянное значение, для определения границы зоны касания в различных торцовых сечениях зуба были рассчитаны расстояния по нормали между модифицированным и теоретическим профилями зуба шестерни и зафиксированы координаты точек, в которых это расстояние имеет одинаковое значение и соответствует условию (1). В каждом торцовом сечении в пределах зоны касания таких точек будет две или одна (на краях зоны касания). В совокупности эти точки и определят границу зоны касания зубьев.

Для компьютерного моделирования станочных и рабочего зацеплений цилиндрических колёс с круговыми зубьями была создана программа [13], позволяющая:

выполнять расчёты геометрических параметров станочных зацеплений шестерни с модифицированными и немодифицированными зубьями;

определять геометрические параметры рабочего зацепления;

рассчитать наладочные параметры зубообрабатывающих станков и параметры инструментов;

создавать исходные данные для визуализации модифицированной и немодифицированной (отсчётной) боковых поверхностей зуба, а также линии уровня приведённых зазоров;

осуществлять трёхмерное графическое построение в системе Компас 3-D модифицированной и отсчётной теоретической поверхностей зуба и границы зоны касания зуба (рис. 4).

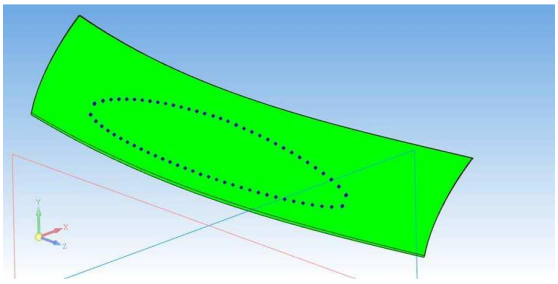


Рис. 4. Модель боковой поверхности зуба шестерни и границы зоны касания зуба

Для подтверждения соответствия разработанной модели моделируемому объекту на четырёхкоординатном станке ОЦ-1И22 было проведено опытное нарезание круговых зубьев партии колёс. Расположение, форма и размеры пятна контакта зубьев проверялись по краске на контрольно-обкатном станке. Оно занимало середину зуба и не выходило на торцы колеса, соответствуя расположению, форме и размерам расчётной зоны касания зуба.

Список литературы

1. Виноградов А.Н., Давыдов А.П., Липатов С.И., Марголит Р.Б., Панков И.Г., Паршин А.Н. Эвольвентные арочные передачи. Инновационная технология высокопроизводительного изготовления // Межотраслевой альманах «Деловая слава России». 2011. № 3 (31). С. 41-45.

2. Виноградов А.Н., Липатов С.И., Марголит Р.Б. Точность нарезания колёс с арочными зубьями // Технология машиностроения. 2013. № 9. С. 23-27.

3. Генкин М.Д., Рыжов М.А., Рыжов Н.М. Повышение надёжности тяжелонагруженных зубчатых передач. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.

4. Wang J., Howard I. A Further Study on High-Contact-Ratio Spur Gears in Mech with Double-Scope Tooth Profile Modification // Geartechnology. 2008. P. 64-70.

5. Kissling U. Effects of Profile Corrections on Peak-to-Peak Transmission Error // Geartechnology. 2010. P. 52-61.

6. Simon V. Optimal Modifications of Gear Tooth Surfaces // Geartechnology. 2011. P. 62-72.

7. Jchibashi A. The characteristics of circular-arc-toothed cylindrical gears // Bull. JSME. 1966. V. 9. № 33. P. 200-208.

8. Андожский В.Д. Геометрический расчёт модификации головок зубьев // Вестник машиностроения. 1976. № 5. С. 39-42.

9. Способ обработки пары цилиндрических зубчатых колёс: пат. RU 2510789. Рос. Федерация. МПК B23F9/02, B23F9/08. Бочкова Д.Е., Бобков М.Н., Шейнин Г.М., Маликов А.А.; опубл. 10.04.14. Бюл. № 10. 5 с.

10. Бобков М.Н., Бочкова Д.Е. Способ модификации зубьев цилиндрических зубчатых колёс // Инструмент и технологии. 2012. № 35. Выпуск 1. С. 15-19.

11. Лопато Г.А., Кабатов Н.Ф., Сегаль М.Г. Конические и гипоидные передачи с круговыми зубьями: справ. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.

12. ГОСТ 19325-73. Передачи зубчатые конические. Термины, определения и обозначения. М.: Изд-во стандартов, 1973. 134 с.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы «Программа расчёта координат точек линии уровня боковой поверхности модифицированного кругового зуба шестерни цилиндрической передачи» для ЭВМ. Бочкова Д.Е., Бобков М.Н.; рег. № 2018614487 от 6.04.18.

Бочкова Дина Евгеньевна, канд. техн. наук, ассистент, bochkovade@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Бобков Михаил Николаевич, д-р техн. наук, профессор, bobkov-mixail@inbox.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Золотова Светлана Андреевна, студент, z2314646@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

PROCESSING OF CIRCULAR TEETH OF A PAIR OF CYLINDRICAL WHEELS WITH LOCALIZED TOUCH ZONE

D.E. Bochkova, M.N. Bobkov, S.A. Zolotova

A new method is proposed for processing circular teeth of a pair of cylindrical wheels, providing the required localization of the zone of contact of the tooth along its length and height without using a tool with a non-standard producing contour. Based on the method and methods for determining the parameters of machine and working gears, a software package has been created that allows you to synthesize the parameters of machine gears, adjustments of gear processing machines and gear cutting tools, providing the required size and location of the contact zone of the teeth in the gear.

Key words: spur gear, circular tooth, tooth contact zone, reduced clearance, level line of reduced clearances, machine engagement, computer model.

Bochkova Dina Evgenievna, candidate of technical sciences, assistant, bochkovade@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Bobkov Mikhail Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, bobkov-mixail@inbox.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Zolotova Svetlana Andreevna, student, z2314646@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.357.6

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ВСТАВОК ПРЕСС-ФОРМ МЕТОДОМ СКОРОСТНОЙ ГАЛЬВАНОПЛАСТИКИ

А.А. Гладун

Рассмотрены процессы изготовления формообразующих вставок пресс-форм для изготовления деталей из пластмасс и других легкоплавких материалов. Приведена технология использования гальванопластики для получения формообразующего инструмента, применения скоростного гальванического осаждения Ni-Co сплавов на поверхности сложного профиля.

Ключевые слова: гальванопластика, пресс-форма, Ni-Co сплав, скоростное гальваническое осаждение.

В промышленности широко используются процессы изготовления деталей из пластмасс и других легкоплавких материалов. Получают такие детали в массовом и серийном производстве методами прессования, выдавливания и литья.

Формообразующие элементы пресс-форм изготавливаются на фрезерных станках (обрабатывающих центрах) с ЧПУ и электроэрозионных станках, более простые поверхности можно получить обработкой давлением, литьем, порошковой металлургией, размерной электрохимической обработкой, гальванопластикой.

При изготовлении пресс-форм механической обработкой применяются многостадийные технологии получения формообразующих поверхностей с этапами черновой и получистовой обработки с промежуточными термическими операциями для снятия остаточных напряжений, с последующей закалкой до рабочей твердости HRC 50…58, устранением возможных деформаций из – за термических напряжений (поверхности изготавливаются по 8…9 квалитетам точности) и с последующей полировкой до Ra = 0,08…0,16.

Далее необходимо хромирование деталей пресс-форм, подверженных повышенному износу, для увеличения твердости и снижения адгезии к формуемому материалу, устранения налипания прессуемого материала и схватывания его с формообразующей поверхностью, что выводит пресс-формы из строя.

Все это делает процесс изготовления формообразующих элементов пресс-форм трудоемким, затратным и долговременным, при этом невозможность получения и тиражирования технологической оснастки в короткие сроки существенно замедляет освоения выпуска новых образцов продукции, снижает ее конкурентоспособность.

Метод гальванопластики имеет достаточно долгую историю применения как для изготовления уникальных деталей, получение другими методами труднореализуемо или невозможно, так и для получения сложнопрофильных рабочих элементов пресс-форм [1, 2]. Российский ученый

Б.С. Якоби в 1838 году обнаружил явление электрохимического выделения металлов из раствором электролитов и является родоначальником использования гальванопластики для получения точных металлических копий электропроводных поверхностей.

Сама копируемая поверхность может быть изготовлена из любого материала, в том числе диэлектрика (пластмассы, стекла, дерева), достаточно получить на ней тончайший электропроводный слой, обычно методами химического осаждения или вакуумного напыления металла. Первое применение гальванопластики связано с изготовлением художественных барельефов и статуй, в том числе шедевров, украшающих Исаакиевский собор. Модель могла изготавливаться из гипса, а электропроводный слой наносился механическим натиранием графита.

Метод гальванопластики обеспечивает полное копирование формы, размеров, микрошероховатости и фактуры поверхности. Так электроосаждением никеля на металлизированную вакуумным напылением металла (никелем, титаном) лавсановую пленку с полимерным покрытием, на которое было нанесено рельефное голографическое изображение, получены матрицы в виде ленты толщиной 100…200 мкм для тиснения голографического изображения на различных поверхностях (этикетках, упаковках, билетах).

Конструкция формообразующего элемента пресс-формы обычно состоит из двух элементов – полученного гальванопластикой тонкостенного рабочего слоя, контактирующего с формуемым материалом, и конструкционного слоя, который придает жесткость форме и позволяет закрепить ее в корпусе пресс-формы.

Технология получения формообразующей вставки состоит из следующих операций – изготовление модели, подготовка поверхности модели к осаждению, гальванического осаждения рабочего слоя, нанесения конструкционного слоя, простейшей механической обработки наружной поверхности конструкционного слоя для получения возможности закрепления вставки в обойме пресс-формы, разделения вставки и модели.

Специально изготавливаемые для гальванопластики модели, являясь обратной копией матрицы, имеют выпуклую поверхность, что значительно упрощает технологию их получения, достижение необходимой точности размеров и шероховатости поверхности. При этом обрабатываются не инструментальные стали, а легко обрабатываемые материалы, выбор которых осуществляет технолог. Модель может быть составной и разборной. Существенной особенностью является также то, что полученные во вставке детали сами могут использоваться как модели для электроосаждения после соответствующей подготовки. В зависимости от материала модели она может использоваться один раз или многократно.

Для получения рабочего слоя используют гальваническое осаждение Ni-Co сплавов, реже никеля или меди из-за низких прочностных характеристик и неудовлетворительной износостойкости. При наличии в сплаве около 30…40% кобальта сплав имеет характеристики закаленной

стали – HRC 48…52, прочность 1.0…1.4 ГПа, при этом сплав является коррозионно-стойким и обладает антиадгезионными свойствами к прессуемым материалам во всем рабочем диапазоне температур эксплуатации пресс-формы. Таким образом, полностью исключается какая либо обработка рабочей поверхности, в том числе и термообработка. При нагреве электролитического сплава до температур 300…400° С он сохраняет достаточную твердость и прочность.

Выбор способа получения конструкционного слоя и его материала определяется температурным режимом эксплуатации пресс-формы и геометрией наружной поверхности рабочего слоя. Наиболее широко применяется заливка легкоплавкими металлами и эпоксидными, пластмассовыми композициями с различными наполнителями, наплавка металла.

Основной недостаток получения вставок методом гальванопластики – низкая скорость электроосаждения, не более 0.01…0,05 мм в час, требуемая толщина достигается за 10 и более суток.

В ТулГУ разработана и изготовлена установка для скоростного гальванического осаждения металлов СГОМ – 1, на которой производилось исследование процесса получения осадков Ni – Co сплавов. Конструкция установки позволяет, в зависимости от формы модели, использовать различные схемы осаждения. Реализуются скорости осаждения, превышающие обычные более чем в 10 раз, в этом же соотношении снижается время получение гальванокопий, что стало результатом применения интенсивного движения электролита в зоне обработки и использования униполярного импульсного тока [3, 4].

Осаждение производилось униполярным импульсным током частотой 25 кГц, скважностью 2, средней плотностью тока 0,1…0,15 А/см^2 из сернокислого электролита следующего состава: $NiSO_4 \times 7H_2O$ – 400 г/л, $CoSO_4 \times 7H_2O$ – 20 г/л , H_3BO_3 – 40 г/л при pH 2,2 и температуре 55 ° С.

В зависимости от формы моделей изменялись схемы подачи электролита, расположение анодов, применялось вращение и возвратно-поступательное движение моделей.

Технология получения формообразующих вставок пресс-форм для получения деталей сложного профиля отработана на вставке для прессования пластмассовых шнеков диаметром 60 мм, длиной 200 мм. В качестве материала модели использовался алюминиевый сплав Д16Т ГОСТ 21488. Между гальваническим сплавом NI-Co и сплавом Д16Т низкая адгезия, поэтому нет необходимости в нанесения разделительного слоя, несмотря на сложный рельеф поверхности модели.

Модель устанавливалась вертикально в рабочей камере установки СГОМ-1, в процессе осаждения вращалась со скоростью 1,6 с$^{-1}$ и перемещалась возвратно-поступательно относительно сопел для подачи электролита с амплитудой 20 мм. Гальваническая копия наращивалась до толщины 1,5…2 мм не более 8 часов, затем усиливалась конструкционным слоем, полученным электродуговым напылением железной низкоуглеродистой проволокой.

После механической обработки наружной поверхности конструкционного слоя в посадочный размер пресс-формы полученная заготовка разрезалась на проволочном электроэрозионном станке на две формообразующие матрицы, из которых извлекались алюминиевые элементы модели. На рис. 1 представлены модель с нанесенным рабочим слоем Ni-Co сплава и формообразующий элемент пресс-формы. На фотографии видно равномерное распределения гальванического осадка по сложному профилю формы.

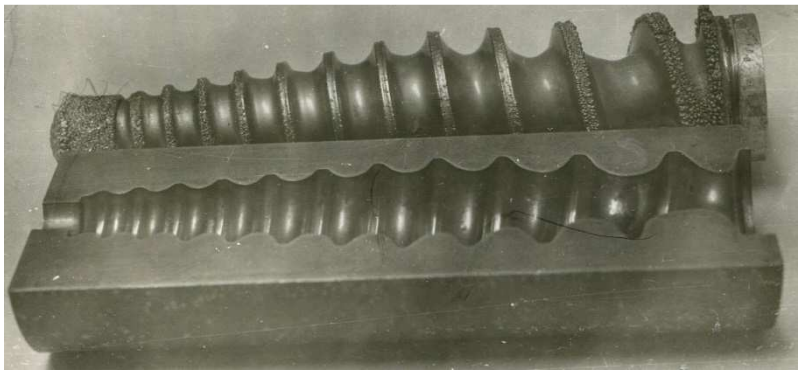


Рис. 1. Готовая матрица для прессования пластмассовых шнеков и модель с нанесенным рабочим слоем Ni-Co сплава

Отработаны процессы получения при высоких плотностях тока гальванокопий с пластмассовых моделей, в том числе с серийно выпускаемых деталей. На диэлектрических поверхностях электропроводный слой создавался металлизацией вакуумным напылением медью либо никелем на установке ВУ-1Б, затем модель размещалась в рабочей камере установки скоростного гальванического осаждения и производилось усиление электропроводного слоя при низких плотностях тока в течение 10 минут, затем в течение 8 часов велось осаждение при рабочих плотностях тока до достижения достаточной толщины осадка. На рис.2 показаны гальванокопия, пластмассовая модель до получения электропроводного слоя, модель с нанесенным на нее слоем Ni – Co сплава.

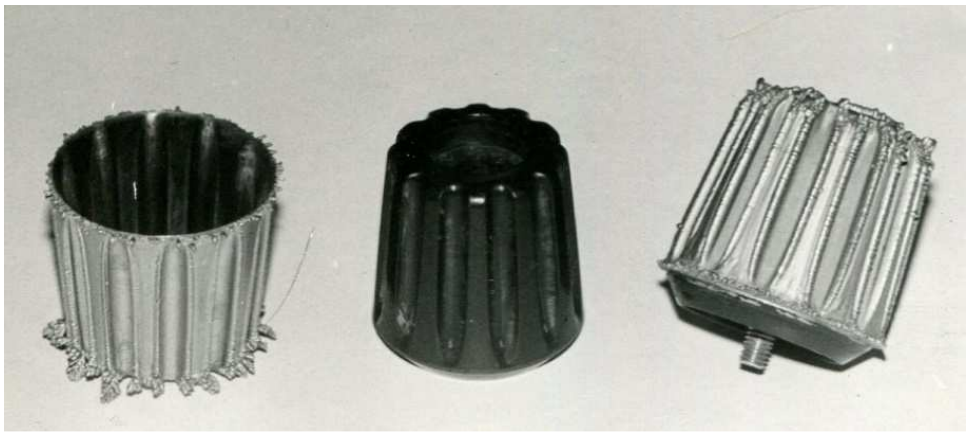


Рис. 2. Гальванокопия, пластмассовая модель, модель с нанесенным слоем Ni-Co сплава

Использование скоростного гальванического осаждения Ni – Co сплавов позволяет многократно повысить скорость процесса получения вставок методом гальванопластики и снизить себестоимость пресс-форм.

Список литературы

1. Кудрявцева О.В. Техническая гальванопластика. СПб.: Политехника, 2010. 147с.

2. Садаков Г.А. Гальванопластика. М.: Машиностроение, 1987, 288с.

3. Сундуков В.К., Гладун А.А., Булычев В.А. Технология и оборудовании для изготовления формообразующих вставок пресс-форм методом скоростной гальванопластики // Оборонная техника. 1995. №11. С.27 – 31.

4. Любимов В.В., Сундуков В.К., Гладун А.А. Изготовление формообразующих элементов пресс-форм методом скоростной гальваники // Проблемы теории проектирования и производства инструмента. Тула: ТулГУ, 1995. С.77 – 79.

Гладун Андрей Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, agtcp@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING MOLD INSERTS BY HIGH-SPEED ELECTROPLATING

A.A. Gladun

The processes of manufacturing forming inserts of molds for the manufacture of parts made of plastics and other fusible materials are considered. The technology of electrotypes to obtain a forming tool, the use of high-speed galvanic deposition of Ni-Co alloys on the surface of a complex profile is presented.

Key words: electrotype, mold, Ni-Co alloy, high-speed electroplating deposition.

Andrey Anatolyevich Gladun, candidate of technical sciences, docent, agtcp@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.923.046; 621.9.04

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОПЕРАЦИОННОГО РАЗМЕРА ПРИ БЕСЦЕНТРОВОМ ШЛИФОВАНИИ

О.П. Решетникова, Б.М. Изнаиров, А.Н. Васин, Н.В. Белоусова, А.В. Панфилова

В работе определена погрешность операционного размера при бесцентровом шлифовании шариков при обработке с ведущими кругами различного профиля. Учтено влияние допуска на диаметр при обработке партии заготовок. Показано, что при бесцентровом шлифовании шаров возникает погрешность базирования по операционному размеру – диаметру сферической поверхности. Предложен способ бесцентрового шлифования сферических заготовок, обеспечивающий минимальную погрешность при обработке партии деталей. Схема реализована за счет наличия на ведущем круге винтовой транспортирующей канавки трапецеидальной формы.

Ключевые слова: бесцентровое шлифование, сфера, шарик, полый шарик, подшипник, шариковый подшипник, точность формы, погрешность.

При механической обработке деталей в серийном и массовом производстве эффективно используют метод автоматического обеспечения точности операционных размеров [1]. При этом обработка ведется партиями на настроенных станках. Использование этого метода позволяет достичь, на первый взгляд, несовместимых результатов: с одной стороны производительность обработки и качество значительно повышаются, а с другой, технологическая себестоимость резко снижается. Однако глубокая теоретическая проработка актуальных вопросов, связанных с этим, показывает, что при определенных условиях возникает так называемая погрешность базирования, которая снижает точность операционного размера и даже может привести к появлению брака. Основной причиной появления этой погрешности является несовмещение технологом при разработке технологического процесса конструкторской и технологической баз. При достаточно высокой квалификации технолога в большинстве случаев удается благополучно избежать этих опасностей. Но существует целый ряд технологических ситуаций, при которых совместить технологическую базу с конструкторской невозможно. В этом смысле особенно специфичной является обработка цилиндрических и сферических деталей на бесцентрово-шлифовальных станках [2, 3, 4].

Методы бесцентрового шлифования достаточно часто применяют при окончательной обработке сферических поверхностей, таких как шарики для подшипников, шарико-винтовых передач и др. [5, 6] Требования к точности деталей сферической формы постоянно увеличиваются, что требует особого подхода к окончательным методам обработки, применяющимся на предприятиях. Основными методами обработки шариков на сегодняшний день являются: обработка чугунными дисками специального сечения с V-образными канавками [7] и методы бесцентрового шлифования шариков [3, 4, 5, 6]. Известны методы обработки шариков, выполнен-

ных из керамических материалов [8], однако не проводились исследования по возможности применения этих методов для обработки шариков из стали.

В условиях серийного производства шариков наиболее приемлемыми методами обработки шариков являются методы бесцентрового шлифования [5, 6, 8, 9]. Такие методы имеют преимущество перед другими, т.к. не требуется применение специального сложного технологического оборудования. При бесцентровом шлифовании шариков достаточно переналадить имеющиеся бесцентрово-шлифовальные станки, что, несомненно, дешевле.

Известен способ бесцентрового шлифования шариков на проход с их угловым разворотом [5, 6, 9], при котором шарики размещают в технологическом устройстве на скошенном опорном ноже и перемещают посредством винтовой канавки ведущего круга вдоль образующей шлифовального круга, который выполнен с разрядными винтовыми канавками на рабочей поверхности. Главный недостаток такого способа – крайне сложная реализация, т.к. резьбовая канавка на ведущем круге может быть выполнена только на специализированном оборудовании, имеющем такую техническую возможность. Однако у станков бесцентрово-шлифовальной группы такая возможность отсутствует. После того, как ведущий круг с выполненной на нем винтовой канавкой будет установлен на бесцентрово-шлифовальный станок, у винтовой канавки появится биение относительно оси шпинделя. Чтобы устранить биение, необходимо боковые поверхности винтовой канавки править «по месту» на бесцентрово-шлифовальном станке, а у станков этой группы такой конструктивной возможности нет. Поэтому точность формы обработанных шариков будет невысокой, т.е. этот способ можно использовать только для черновой обработки.

Дело в том, что схема базирования заготовок при их обработке указанным способом абсолютно нетривиальна. При бесцентровом шлифовании заготовки базируются по обрабатываемой поверхности. Затем в процессе обработки технологическая база не просто сразу же срезается, но и постоянно обновляется.

Измерительной базой при формировании операционного размера - диаметра - является центр кругового сечения не зависимо от того, цилиндрическую или сферическую форму имеет заготовка. Совершенно очевидно, что технологическая и конструкторская (измерительная) базы при этом не только не совмещены по факту, но и не могли быть совмещены принципиально. Кроме того, указанный центр в процессе обработки непрерывно смещается. Эти обстоятельства с неизбежностью вызывают появление погрешности по операционному размеру – по диаметру.

Характерно, что наладочным размером при бесцентровом шлифовании обработки является не диаметр, а величина хорды $K-K_1$, соединяющей точки контакта обрабатываемой поверхности с поверхностями ведущего и шлифовального кругов. Поэтому фактически выполняемым размером будет не диаметр сферы, а именно величина этой хорды. При этом, даже при обработке единичной заготовки, возникает погрешность размера

ξ, равная величине проекции смещения измерительной базы – центра кругового сечения – на направление наладочного размера – хорды $K-K_1$ (рис. 1).

При показанной на рис. 1 схеме обработки шариков погрешность получаемого размера можно определить следующим образом:

$$\xi = 2\cdot\sqrt{\frac{d^2}{4}-h_1^2\cdot\frac{1}{(d+D_B)^2}}-2\cdot\sqrt{\frac{d^2}{4}-h^2\cdot\frac{D_3^2}{(D_3+D_B)^2}}, \qquad (1)$$

где D_3 и d – диаметр заготовки и диаметр готового шара соответственно; D_B – диаметр ведущего круга; h – величина превышения центра обработанного шара над плоскостью, в которой расположены оси ведущего и шлифовального кругов в начальный момент обработки;

$$h_1 = h-\left(\frac{D_3-d}{2}\right)\cdot(1-\sin(\alpha)), \qquad (2)$$

где α - угол скоса опорного ножа; h_1 – величина превышения центра обработанного шара над плоскостью, в которой расположены оси ведущего и шлифовального кругов после окончания обработки.

Эта погрешность не является погрешностью базирования, так как последняя имеет место только при обработке целой партии деталей на настроенном станке и зависит от допуска на операционный размер. Чтобы учесть это обстоятельство, необходимо скорректировать зависимость (2):

$$h_1 = h-\left(\frac{D_3-d-T}{2}\right)\cdot(1-\sin(\alpha)), \qquad (3)$$

где T – величина допуска на диаметр обрабатываемой детали.

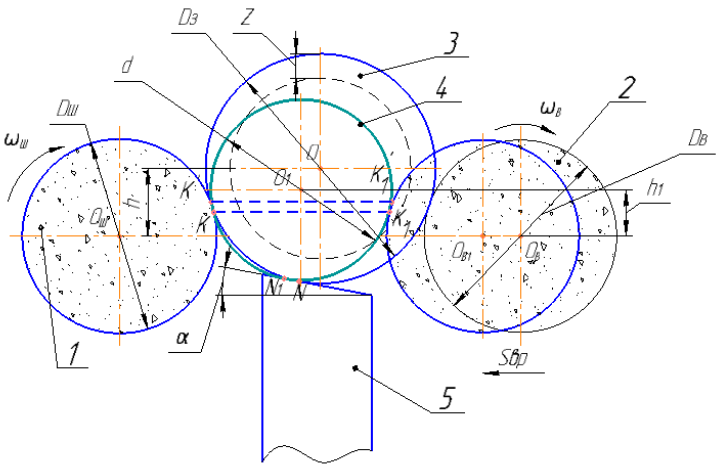


Рис. 1. Схема врезного бесцентрового шлифования с подачей ведущим кругом : 1 – шлифовальный круг; 2 – ведущий круг; 3 – заготовка шарика; 4 – шарик после обработки; 5 – опорный нож

С учетом (3) зависимость (1) определяет величину погрешности операционного размера при условии, что ведущий абразивный круг имеет цилиндрическую форму с прямолинейной образующей, параллельной его оси.

В том случае, если на поверхности ведущего круга выполнена транспортирующая канавка, имеющая призматический профиль [5, 6] (рис. 2), суммарная погрешность операционного размера может быть определена следующим образом.

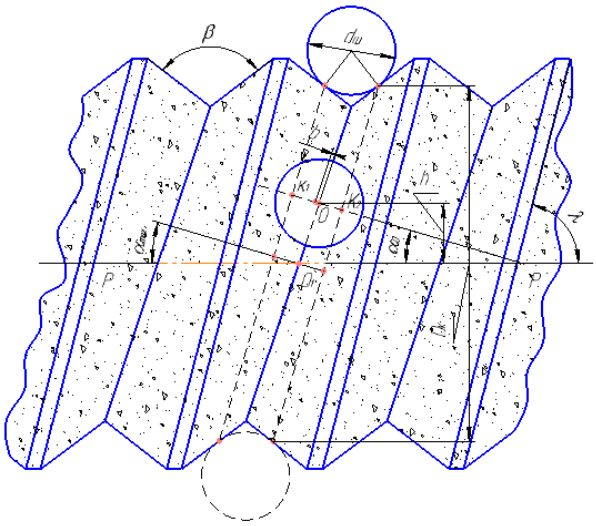


Рис. 2. Форма ведущего абразивного круга с винтовой канавкой призматического профиля [5, 6]

Дополнительное смещение измерительной базы – центра сферы – в глубину канавки в результате уменьшения диаметра заготовки в процессе съема припуска:

$$\Delta = \frac{(D_3 - d - T)}{2} \cdot \left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} \right), \tag{4}$$

где β - угол профиля винтовой канавки.

Величина проекции (4) на направление хорды $K - K_1$ (рис.1):

$$\Delta_1 = \Delta \cdot \frac{d}{2 \cdot \sqrt{\frac{d^2}{4} - h_1^2}} \tag{5}$$

Суммарная величина погрешности наладочного размера равна арифметической сумме выражения (1) с учетом (3) и удвоенного значения выражения (5):

$$\xi_\Sigma = \xi + 2 \cdot \Delta_1. \tag{6}$$

Анализ зависимостей (1) – (6) полностью отражает логику технологической подготовки операции бесцентрового шлифования и организации конфигурации рабочей зоны.

Совершенно логично, что если в качестве технологического процесса получения заготовки использовать более точный метод ($D_3 \to d$, $T \to \min$), то погрешность операционного размера уменьшается.

Увеличение угла профиля транспортирующей канавки способствует уменьшению этой погрешности, причем, при $\beta = \pi$ величина погрешности принимает минимальное значение.

Угол скоса опорного ножа также оказывает влияние на величину погрешности: при уменьшении α до нуля погрешность ξ_Σ также снижается.

Диаметр ведущего абразивного круга необходимо принимать наибольшим в пределах диапазона, допускаемого конструкцией станка. Это позволяет снизить погрешность операционного размера.

На основании вышеизложенного авторами предлагается способ обработки сферических тел качения (рис 3). На рис. 3 показан главный вид – схема рабочей зоны устройства и разрез А–А главного вида устройства.

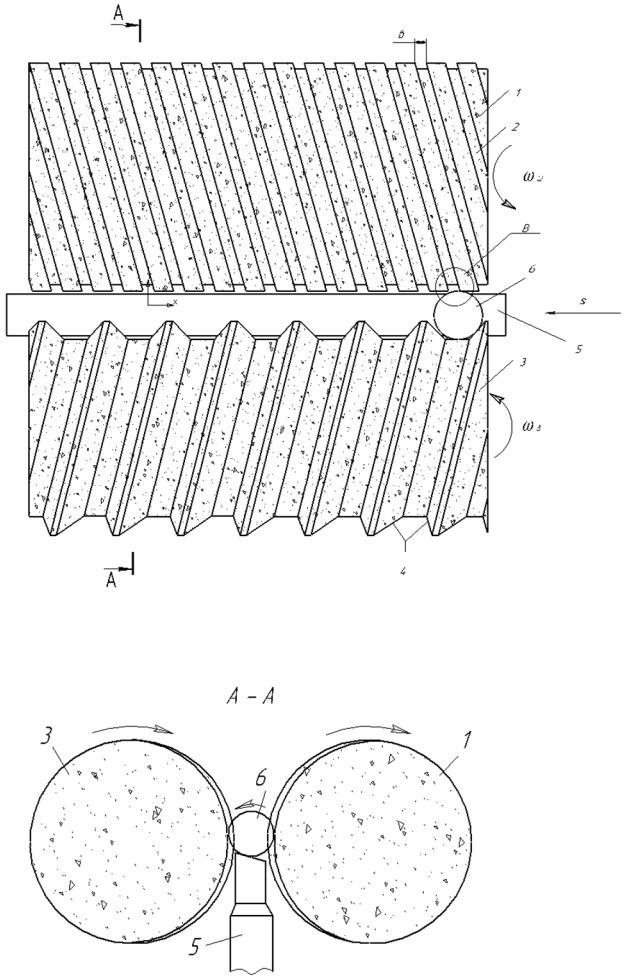


Рис. 3. Конфигурация рабочей зоны при бесцентровом шлифовании ферической детали с ведущим кругом, имеющим винтовую ранспортирующую канавку трапецеидального профиля:
1 - шлифовальный круг; 2 - винтовая канавка шлифовального круга;
3 - абразивный ведущий круг; 4 - винтовая транспортирующая канавка рапецеидального профиля; 5 - опорный нож;
6 - обрабатываемые шарики

Способ заключается в следующем. Заготовку 6 располагают между шлифовальным 1 и ведущим 3 абразивными кругами, оси которых параллельны. Кругам сообщают однонаправленное вращение со скоростями $\omega_{Ш}$ и $\omega_{В}$. В качестве опоры заготовки используют нож 5, представляющий собой односкосый клин с уклоном в сторону ведущего круга, что обеспечивает необходимый контакт с последним до начала обработки за счет составляющей силы тяжести. Это позволяет передавать вращение заготовке от ведущего круга.

Рабочая зона формируется совокупностью канавок, выполненных: одна в виде винтовой линии 2 с прямоугольным профилем на периферии шлифовального круга, вторая 4 - в виде трапеции на периферии ведущего круга.

Главное отличие предлагаемого устройства от аналогов – в изменении конструкции ведущего круга. Выполнение винтовой канавки трапецеидального профиля на ведущем круге позволяет осуществлять правку несущей части ведущего круга непосредственно на бесцентрово-шлифовальном станке и устранить, тем самым, биение ведущего круга. Для реализации правки ведущего круга не требуется дополнительного резьбонарезного устройства, что значительно упрощает и удешевляет эту операцию и позволяет использовать имеющееся на производстве станочное оборудование

При этом значительно уменьшается погрешность базирования сферической заготовки, поскольку последняя устанавливается не в призматической канавке ведущего круга, а на ее прямолинейном дне, что приводит к повышению точности и уменьшению разноразмерности обработанных шариков.

Заключение:

1. Установлено, что классическая наладка станка при бесцентровом шлифовании шариков дает неприемлемо большую погрешность размеров шариков.

2. Определена погрешность базирования, возникающая в процессе бесцентрового шлифования шариков при применении различной формы винтовой канавки ведущего круга с учетом допуска на получаемый размер шариков.

3. Предложен способ бесцентрового шлифования шариков, отличающийся наличием на ведущем круге транспортирующих канавок трапецеидального профиля.

4. Показано, что применение на ведущем круге транспортирующей канавки трапецеидальной формы позволяет повысить точность обрабатываемой сферической поверхности.

5. Для правки ведущего круга при этом не требуется дополнительного резьбонарезного устройства, что значительно упрощает и удешевляет эту операцию.

Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук № МК-2395.2020.8.

Список литературы

1. Демин Ф.И. Обеспечение точности геометрических параметров при изготовлении деталей ГТД: учебное пособие. Самара: Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета, 2010. 84 с.

2. Ашкиназий Я.М. Бесцентровые круглошлифовальные станки. М.: Машиностроение, 2003. 352 с.

3. Захаров О.В., Бржозовский Б.М. Минимизация погрешностей базирования при бесцентровом шлифовании и суперфинишировании // Конструкторско-технологическая информатика. М.: МГТУ «Станкин», 2005. С. 93-96.

4. Захаров О.В., Горшков В.В. Обеспечение точности при бесцентровом шлифовании с поперечной подачей // Автоматизация и современные технологии, 2006. №10. С. 11-15.

5. Бочкарев А.П. Совершенствование метода обработки полых тел сферической формы // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 58. С. 17-20.

6. Васин А.Н., Изнаиров Б.М., Бочкарев П.Ю. Наукоемкая формообразующая технология бесцентрового шлифования шариков // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2012. N 3. С. 3-10.

7. Щетникович К.Г. Влияние профиля кольцевой канавки на формообразование сферической поверхности шариков при доводке // Вестник машиностроения. 2010. №2. С. 25-29.

8. Yong Bo Wu, Wei Xing Xu, Fujimoto M., Tachibana T. Ceramic balls machining by centerless grinding using a surface grinder // Advanced Materials Research, 2011. Volume 325. P. 103 – 109. DOI: 10.4028/ www. scientific.net/AMR.325.103.

9. Васин А.Н., Изнаиров Б.М., Бочкарев А.П. Взаимодействие заготовки со шлифовальным кругом при бесцентровом шлифовании шариков // СТИН. 2013. № 7. С. 18-21.

Решетникова Ольга Павловна, канд. техн. наук, доцент, olgareshetnikova1@yandex.ru, Россия, Саратов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

Изнаиров Борис Михайлович, канд. техн. наук, доцент, bageev1@mail.ru, Россия, Саратов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

Васин Алексей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, vasin@sstu.ru, Россия, Саратов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

Белоусова Наталия Валерьевна, аспирант, tusichka18061990@mail.ru, Россия, Саратов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

Панфилова Анастисия Вячеславовна, аспирант, anastasiyapanfilova@icloud.com, Россия, Саратов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

DETERMINATION OF OPERATIONAL SIZE ERROR AT CENTERLESS GRINDING

O.P. Reshetnikova, B.M. Iznairov, A.N. Vasin, N.V. Belousova, A.V. Panfilova

In the article, an error of the operational size is determined for centerless grinding of balls during processing with driving circles of various profiles. The influence of the lappus on the batch of billets was taken into account. It is shown that with centerless grinding of balls, an error of basing by the operational size – the diameter of the spherical surface occurs. A method for centerless grinding of spherical billets is proposed, which provides a minimum error when processing a batch of parts. The scheme is implemented due to the presence of a trapezoidal screw conveyor groove on the driving circle.

Key words: centerless grinding, sphere, ball, hollow ball, bearing, ball bearing, shape precision.

Reshetnikova Olga Pavlovna, candidate of technical sciences, docent, olgareshetnikova1@yandex.ru, Russia, Saratov, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,

Iznairov Boris Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, bageev1@mail.ru, Russia, Saratov, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,

Vasin Alexey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, vasin@sstu.ru, Russia, Saratov, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,

Belousova Natalia Valeryevna, postgraduate, tusichka18061990@mail.ru, Russia, Saratov, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,

Panfilova Anastasia Vyacheslavovna, postgraduate, anastasiypanfilova@icloud.com, Russia, Saratov, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

УДК 621.9.06; 621.924.57

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАГОТОВКИ ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА НА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

А.С. Серков, В.Б. Масягин, Л.Б. Серкова

В статье рассмотрены результаты исследования 3D-модели зубчатого колеса методом конечных элементов (МКЭ) на напряженно-деформированное состояние (НДС). Модель находится в статическом равновесии от действия сил зажима кулачками самоцентрирующего патрона при различных схемах базирования. Новизна заключается в исследовании влияния сил зажима на НДС зубчатого колеса при различных схемах базирования в 3-х и 6-ти кулачковых патронах. Производится анализ полученных результатов МКЭ с результатами полученными физическим экспериментом (фотомеханика). Подтверждается адекватность, полученной математической модели.

Ключевые слова: нежёсткая заготовка зубчатого колеса, метод конечных элементов, математическое моделирование, математическая модель, 3D-моделирование, АРМ FEM, Компас 3D, напряженно-деформированное состояние (НДС).

Изготовление нежёстких зубчатых колёс или шестерней повышенной точности, подвергающихся закалке или цементации на этапах технологического процесса, связано с трудностью обеспечения точности формы

базового отверстия, эвольвентного профиля колеса и их относительного расположения друг относительно друга. При цементации или закалки заготовки колеса, возникает коробление поверхностей, смещаются оси делительного диаметра и центрального отверстия друг относительно друга, возникает погрешность эксцентриситета. Поэтому в технологический процесс после термической обработки вводят финишные операции такие как шлифование базовых и рабочих поверхностей. Если не вводить эти операции, то в процессе эксплуатации такие детали в большей степени будут подвержены повышенному износу в результате чего будет сокращаться срок службы изделия. Оценка погрешности базирования и измерения радиальных биений описана в работе [1].

Из технической литературы известно влияние усилия зажима заготовки на погрешность обработки [2]. Усилия зажима заготовок в приспособлениях вызывают упругие деформации, которые порождают погрешности ее формы (рис. 1).

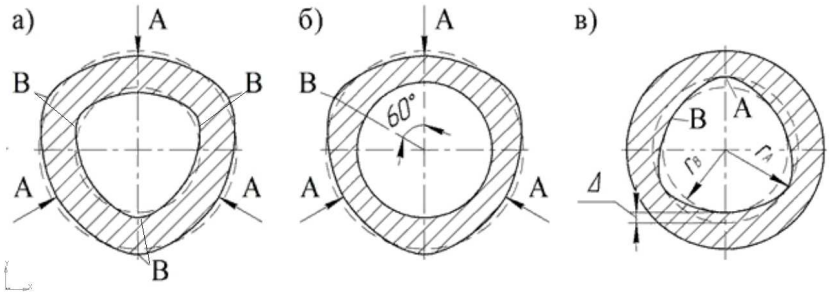


Рис. 1. Схема возникновения погрешности формы отверстия тонкостенной втулки: а – упругая деформация втулки при закреплении в 3-х кулачковом патроне; б – форма отверстия после шлифования; в – форма контура отверстия после раскрепления втулки

При зажиме втулки в самоцентрирующем патроне возникает её упругая деформация, при этом в местах “А” контакта кулачков радиус заготовки уменьшается, а в точках “В” увеличивается. Погрешность геометрической формы обрабатываемого отверстия втулки рассчитывается по формуле $\Delta=r_A-r_B$, где r_A – наибольший радиус, а r_B – наименьший радиус (рис. 1, в). Погрешность геометрической формы отверстия при ее закреплении в кулачковых патронах значительна. Значение геометрической формы зависит от числа зажимных кулачков патрона. По данным работы профессора В. С. Корсакова [3] при увеличении количества зажимных кулачков патрона погрешность геометрической формы втулки заметно уменьшается, т. е., если погрешность геометрической формы тонкостенной втулки после обработки с закреплением в 2-х кулачковом патроне принять за 100%, то при закреплении в 3-х кулачком патроне она составит 21%, в 4-х кулачковом – 8%, в 6-ти кулачковом – 2%.

В производстве для окончательной обработки центрального отверстия зубчатого колёса в основном применяют три схемы базирования:

1) по эвольвентному профилю через установочные ролики в 3-х кулачковом самоцентрирующем патроне [4-8];

2) по внешнему контуру зубчатого колеса напрямую в 3-х кулачковом самоцентрирующем патроне;

3) по эвольвентному профилю через установочные ролики в 6-ти кулачковом самоцентрирующем патроне;

Первая и третья схемы базирования наиболее предпочтительнее, так как обеспечивается короткая размерная цепь между отверстием зубчатого колеса и делительной окружностью. В случае применения второй схемы требуется дополнительно повышать точность промежуточной базы (наружный диаметр), это ведёт к ненужным материальным затратам.

Усилия зажима заготовки зубчатого колеса в приспособлении вызывают упругие деформации, которые порождают погрешности ее формы. На рис. 2 представлена схема нагружения и возникновения погрешности формы отверстия, где Q_n – сила зажима; $F_{тр.}$ – сила трения; $n_{ш.\ кр.}$ – частота вращения шлифовального круга; $n_{заг.}$ – частота вращения заготовки; P_Z – составляющая равнодействующей силы резания.

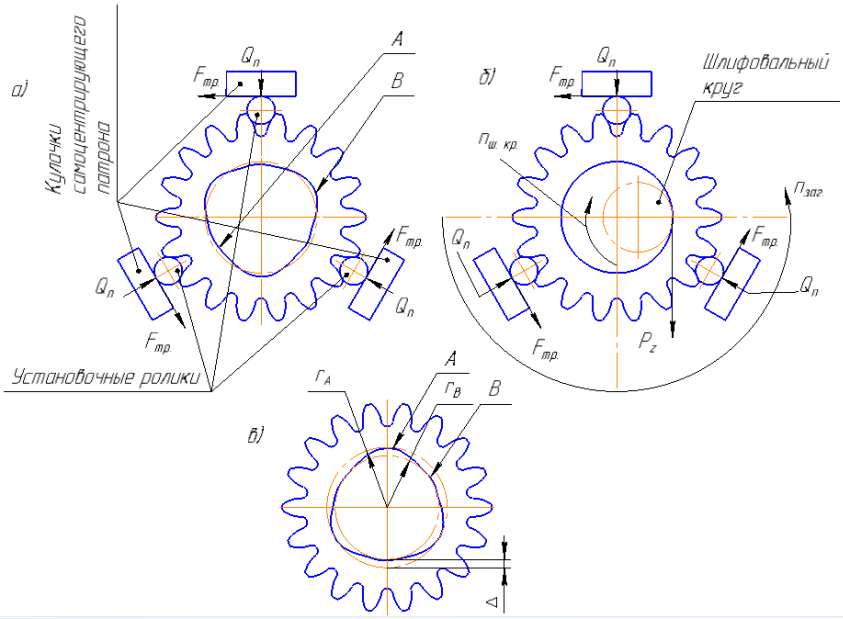


Рис. 2. Схема нагружения и возникновения погрешности формы отверстия заготовки зубчатого колеса: а – упругая деформация заготовки при закреплении в 3-х кулачковом патроне; б – форма отверстия после шлифования; в – форма контура отверстия после раскрепления заготовки

В рассмотренных трёх случаях отверстие зубчатого колеса перед обработкой (шлифование) упруго деформируется из-за приложенных сил зажима, изменяя его начальную форму (рис. 2, а), аналогично в случае зажима тонкостенной втулки. В процессе обработки в патроне в зажатом состоянии обеспечивается правильная и точная форма отверстия (рис. 2, б). После снятия с зубчатого колеса сил зажима упругие деформации, восста-

навливаются и достигнутая при обработке правильная и точная форма отверстия зеркально изменяется (рис. 2, в) в соотношении с вариантом на момент начала обработки.

Рассмотрим информацию по данному вопросу из работы [9]. При чистовой обработке центрального отверстия зубчатого колеса следует учитывать отклонение от круглости $\Delta=r_A-r_B$, которое возникает при закреплении в патроне (рис. 2), отклонение от круглости можно рассчитать по формуле:

$$\Delta = K_n \frac{\sum Fr^3}{JE},$$

где K_n – коэффициент, значение которого зависит от количества зажимных кулачков n (таблица); $F\sum$ - сумма сил зажима; r – средний радиус тела колеса без учета зубьев; J – момент инерции; E – модуль упругости материала зубчатого колеса.

Зависимость коэффициента K_n от количества кулачков

n	3	4	5	6	7	8
K_n	0,009	0,0025	0,001	0,0005	0,0002	0,0001

Рассмотренная информация из технической литературы о деформациях тонкостенной втулки при закреплении в патронах частично может быть применима в данном исследовании для случая базирования по внешнему контуру зубчатого колеса.

Объектом исследования является 3D-модель заготовки зубчатого колеса. Предметом исследования является НДС 3D-модели заготовки зубчатого колеса в момент её закрепления кулачками в патроне с имитацией различных схем базирования.

Методами и инструментами фотомеханики [10] в работах [11-19] рассмотрено исследование НДС оптических моделей зубчатых колёс, произведены достаточно сложные физические эксперименты. При данном эксперименте тяжело учесть остаточные напряжения, которые возникают в процессе изготовления оптических моделей, а также те напряжения, которые возникают входе повторных экспериментов, в свою очередь это может искажать картину напряжений, в следствии этого предлагается произвести более точное исследование с помощью МКЭ.

Для установления влияния на НДС зубчатого колеса от сил зажима кулачками самоцентрирующего патрона необходимо выполнить исследование с помощью МКЭ. Для исследования моделируется НДС нежесткого зубчатого колеса от сил зажима в 3-х и 6-ти кулачковом патроне. Сила зажима для каждого варианта рассчитывается из условия постоянства момента сил трения от сил зажима, обеспечивающих надежное удержание заготовок в патроне от сил резания.

Геометрические параметры зубчатого колеса: модуль зуба **m**=3 мм.; угол профиля α=20°; радиус делительной окружности **r**=27 мм.; радиус вершин зубьев колеса **Re**=30 мм.; радиус основной окружности **r**0=25,37 мм.; радиус окружности точки касания ролика с зубьями **R**≈28,6 мм.; число

зубьев **Z**=18; расчетный диаметр установочного ролика **d**=8 мм.; точка контакта ролика и кулачка $\mathbf{X}_0$=34,76 мм.; угол соответствующий половине шага зубьев φ=10°; толщина зуба по делительной окружности S=4,71 мм. Для базирования по эвольвентному профилю зубьев колеса диаметр установочного ролика **d** приспособления рассчитан по стандартной методике [20]. Рассчитан радиус **R** контакта ролика с зубом и кулачка $\mathbf{X}_0$ с роликом для установки зубчатого колеса в самоцентрирующем патроне (рис. 3).

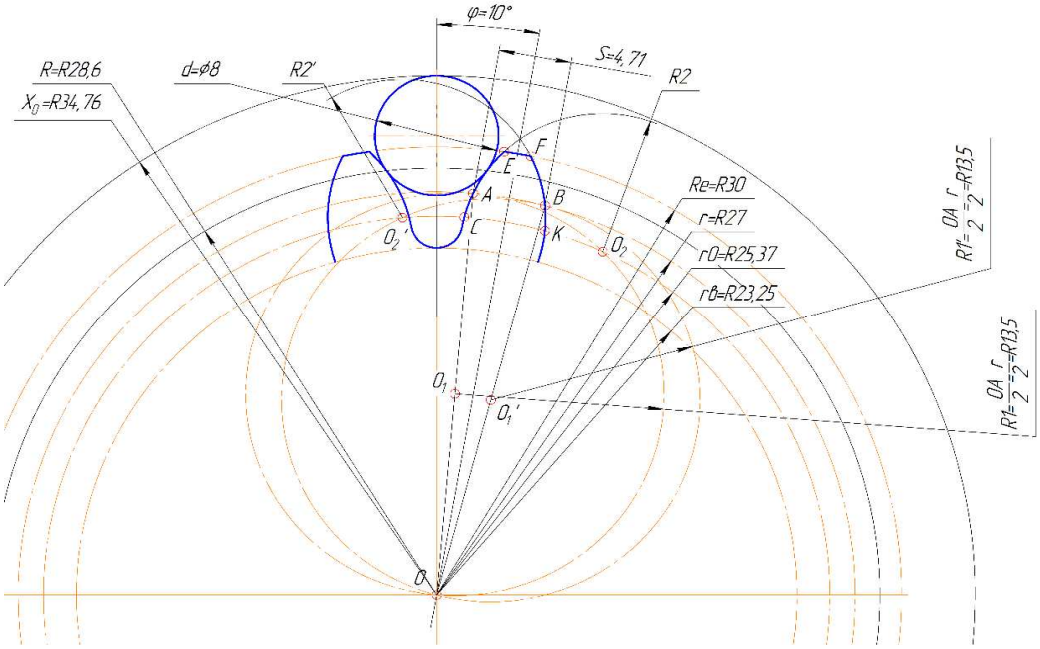


Рис. 3. Схема для расчета диаметра установочных роликов технологической оснастки

Моделирование напряженно-деформированного состояния зубчатого колеса при базировании по эвольвенте в 3-х кулачковом патроне.

Для расчета была разработана 3D-модель зубчатого колеса с числом зубьев z = 18, модулем зуба m = 3 мм, центральным отверстием d = 32 мм. (рис. 4). Толщина модели зубчатого колеса равна 5 мм, материал сталь 20Х2Н4А ГОСТ 4543-2016.

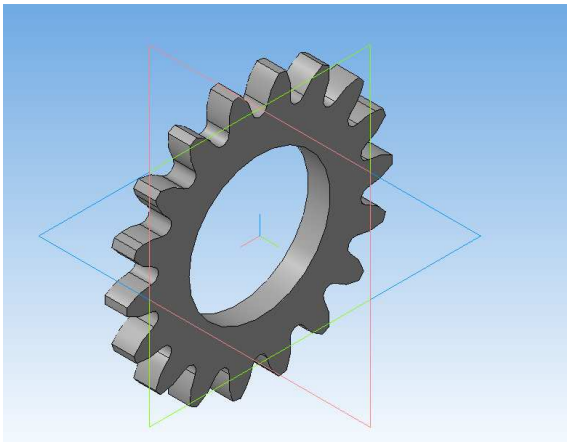


Рис. 4. Модель зубчатого колеса

Исследования НДС 3D-модели зубчатого колеса производились на ЭВМ в программном продукте «Компас-3D V16.1 АРМ FEM: Прочностной анализ».

Закрепления в данном случае устанавливаются по торцевой поверхности и по эвольвенте зубьев колеса.

В результате расчётов была получена картина напряжений на деформированной и недеформированной моделях зубчатого колеса (рис. 5). Визуально по цвету, определяется величина напряжений: красным цветом - максимальное значение, синим - минимальное, нулевые или изотропные зоны также окрашены в синий цвет. Аналогично оптическим моделям [10-19], на свободном контуре отверстия нагруженной модели нулевая точка указывает на отсутствие в ней напряжений, те напряжения, которые располагаются по разные стороны от нулевых точек, указывают на то, что на таких напряженных участках происходит смена знака нормальных главных напряжений, которые направлены по касательной к контуру в точке касания.

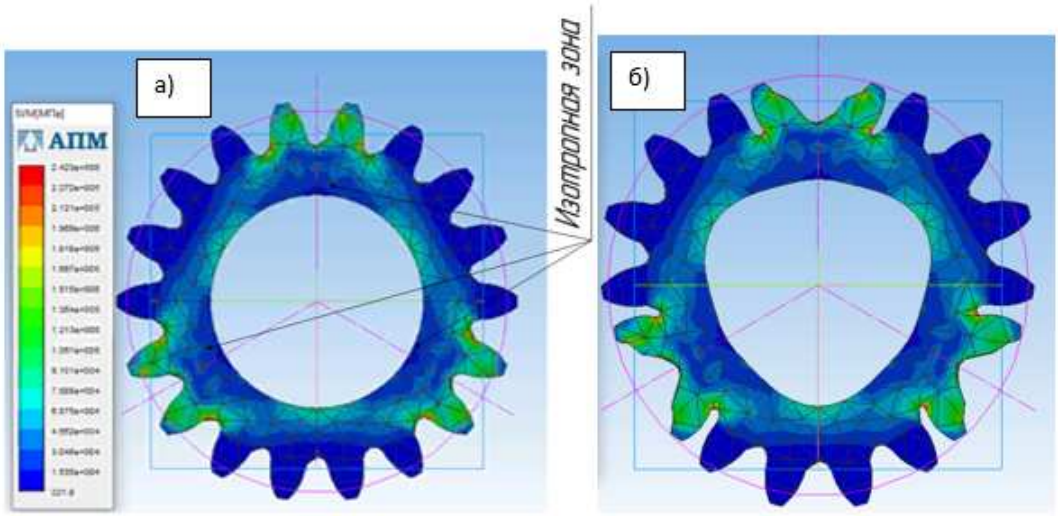


Рис. 5. Карты нагруженного зубчатого колеса силами зажима по эвольвенте в случае применения 3-х кулачкового самоцентрирующего патрона: а – без отображения деформаций; б – с отображением деформаций

Для наглядности была построена карта нагруженного зубчатого колеса с отображением изолиний (рис. 6). Полученная картина изолиний отображает максимальные касательные напряжения.

Моделирование напряженно-деформированного состояния зубчатого колеса при базировании по наружному диаметру в 3-х кулачковом патроне.

Моделирование по наружному диаметру производится аналогично методу, описанному выше, за исключением того, что закрепления устанавливаются по внешнему диаметру зубьев колеса. Была получена картина напряжений на деформированной и недеформированной моделях зубчатого колеса (рис. 7).

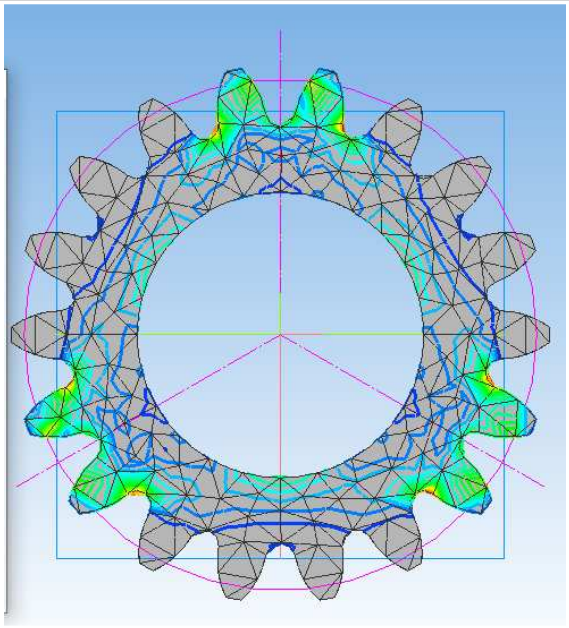


Рис. 6. Карта с отображением изолиний

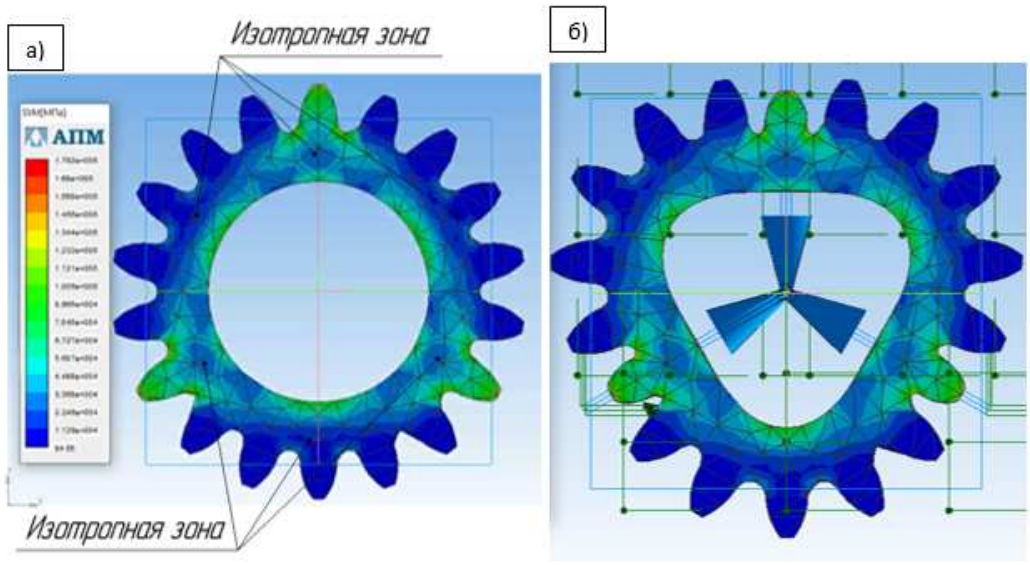


Рис. 7. Карты нагруженного зубчатого колеса силами зажима по наружному диаметру в случае применения 3-х кулачкового самоцентрирующего патрона: а – без отображения деформаций; б – с отображением деформаций

Для наглядности была построена карта нагруженного зубчатого колеса с отображением изолиний (рис. 8).

Моделирование напряженно-деформированного состояния зубчатого колеса при базировании по эвольвенте в 6-ти кулачковом патроне.

Моделирование по эвольвенте производится аналогично методу, описанному в первой схеме базирования. Закрепления в данном случае устанавливаются по торцевой поверхности и по эвольвенте зубьев колеса. В результате расчётов была получена картина напряжений на деформированной и недеформированной моделях зубчатого колеса. (рис. 9).

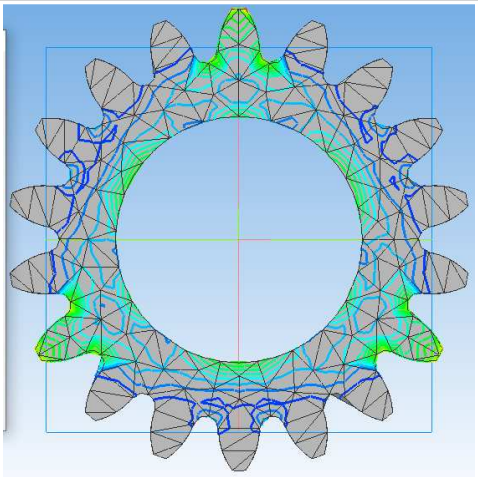


Рис. 8. Карта с отображением изолиний

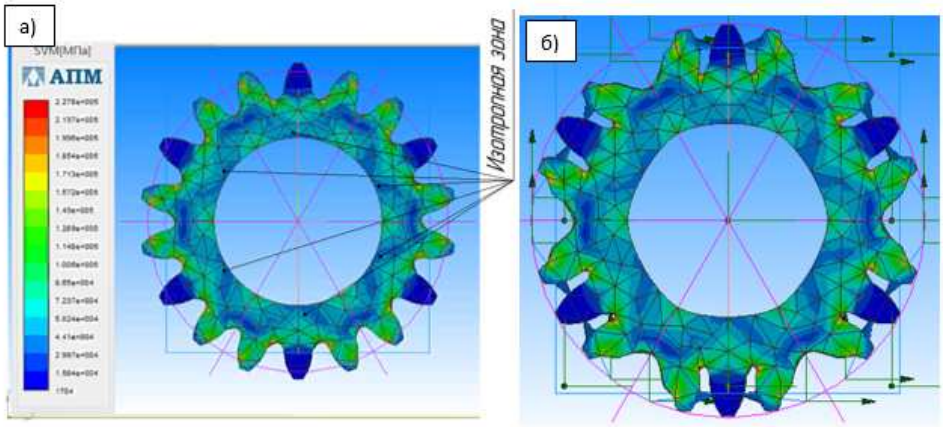


Рис. 9. Карты нагруженного зубчатого колеса силами зажима по эвольвенте в случае применения 6-ти кулачкового самоцентрирующего патрона: а – без отображения деформаций; б – с отображением деформаций

Для наглядности была построена карта нагруженного зубчатого колеса с отображением изолиний (рис. 10).

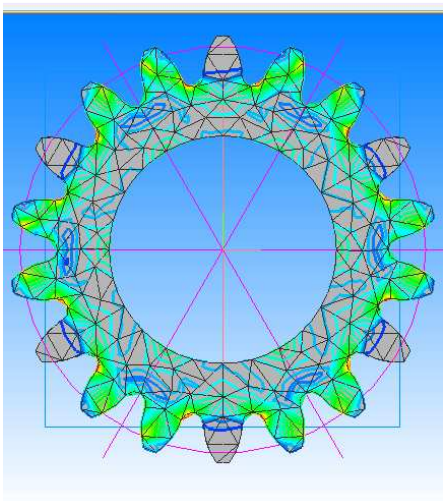


Рис. 10. Карта с отображением изолиний

Заключение. В варианте базирования по эвольвенте зуба в 3-х кулачковом патроне (рис. 5) имеет место значительное отличие в характере НДС контура отверстия от сил зажима. Анализируя количество изолиний (рис. 6, 8), лежащих вблизи контура отверстия колеса, был сделан вывод, о том, что растягивающих и сжимающих напряжений при базировании по эвольвентному профилю зуба будет намного меньше, чем при базировании по внешнему контуру зуба. Характер деформаций отверстия колеса будет аналогичным его напряженному состоянию. Это даёт право утверждать, что вариант базирования по эвольвентному профилю наиболее предпочтителен в связи с минимальными напряжениями, возникающими на контуре отверстия и, следовательно, упругими деформациями контура отверстия от сил зажима до начала его обработки (шлифование), которые изменяют исходную форму, в доказательство приведены карты напряжений с отображением деформаций (рис. 5, б, рис. 7, б).

В случае базирования по эвольвенте в 6-ти кулачковом патроне и варианту базирования по эвольвенте в 3-х кулачковом патроне, характер НДС контура отверстия для первой схемы базирования качественно отличается (рис. 9). Присутствуют, как напряжения сжатия, так и напряжения растяжения, причём они равны друг другу. На окружности в каждом радиальном сечении напряженного тела колеса наблюдается изотропная зона, которая то приближается к зубчатому контуру в местах приложения силы зажима, то отдаляется от него, выходя на контур отверстия на участках под ненагруженными зубьями, в этих местах проявляются нулевые точки с короткими участками растягивающих напряжений с незначительными значениями.

Таким образом, при базировании в 6-ти кулачковом патроне по эвольвенте зуба контур отверстия зубчатого колеса незначительно изменяет, как свою форму, так и свой диаметральный размер (рис. 9, б). Таким образом, чем больше суммарный ход упругих напряжений с противоположным знаком, тем больше будут искажения формы отверстия, т.к. их влияние разнонаправлено.

Анализ результатов свидетельствует о том, что перераспределение силы зажима на большее число точек ее приложения уменьшает, как величину хода упругих напряжений, а, следовательно, и деформаций, так и создает равномерное НДС одного знака на контуре отверстия, что минимизирует его влияние на изменение формы после снятия сил зажима. Полученные результаты соответствуют реальной конструкции с учетом коэффициентов геометрического и силового подобия.

Результаты, полученные математическим моделированием схожи, с результатами, которые были получены физическим экспериментом средствами фотомеханики [11-19], следовательно, математическое моделирование выполнено правильно.

МКЭ позволяет исследовать конструкции почти неограниченной степени сложности, в то время как это объективно невозможно с использованием аналитических методов [21].

Список литературы

1. Печенин В.А., Болотов М.А. Математическая модель, имитирующая базирование зубчатых колёс на КИМ при использовании штифтов // Материалы научного форума с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. М.С. Кокорин (отв. ред.). Спб: Изд-во СПБПУ, 2015. С. 285-287.

2. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник. 4-е изд., стер. Москва: Издательство «Лань», 2016. 512 с.

3. Кован В.М., Корсаков В.С., Косилова А.Г., Калинин М.А., Капустин Н.М., Солодов М.Д. Основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1977. 416 с.

4. Серков А.С., Сайфулин И.И., Палина О.В., Блохин Д.А., Антропова Л.Б., Попов П.Е., Кольцов А.Г. Снижение себестоимости шлифования посадочных отверстий и торцев цилиндрических прямозубых зубчатых колес за счёт внедрения универсальной оснастки // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сборник научных трудов 7-ой Международной научно-практической конференции. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2017. С. 323-327.

5. Серков А.С., Антропова Л.Б. Внедрения универсальной оснастки в операцию шлифования центральных отверстий цилиндрических прямозубых зубчатых колёс // Метрология, стандартизация и управление качеством: Материалы III Всерос. науч.-техн. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2018. С. 105-108.

6. Серков А.С., Антропова Л.Б. Шлифование центрального отверстия цилиндрического прямозубого зубчатого колеса с помощью универсальной оснастки // Проблемы эффективного использования научного потенциала общества: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. Стерлитамак: АМИ, 2019. Ч. 2. С. 178-181.

7. Серков А.С., Антропова Л.Б. Обработка отверстия и торца цилиндрического прямозубого зубчатого колеса с помощью универсальной оснастки методом шлифования // Научные революции: Сущность и роль в развитии науки и техники: Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. Стерлитамак: АМИ, 2019. Ч. 1. С. 33-36.

8. Серков А.С., Серкова Л.Б., Елецкая С.Ф. Применение универсальных трёхкулачковых патронов для шлифования отверстий в цилиндрических прямозубых зубчатых колёс // Метрология, стандартизация и управление качеством: материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. С. 81-84.

9. Калашников С.Н. Производство зубчатых колес: справочник / С.Н. Калашников, А.С. Калашников, Г.И. Коган [и др.]: под общ. ред. Б.А. Тайца. М.: Машиностроение. 1990. 464 с.

10. Кошеленко А.С., Позняк Г.Г. Теоретические основы и практика фотомеханики в машиностроении. М.: Граница, 2004. 296 с.

11. Бердашев Р.С. Исследование методом фотомеханики влияния на напряженно-деформированное состояние зубчатого колеса сил зажима в самоцентрирующем патроне // Сборник научных статей студентов и аспирантов - победителей международных, всероссийских и университетских конкурсов. Москва: Российский университет дружбы народов (РУДН), 2014. С. 76-80.

12. Рогов В.А., Кошеленко А.С., Хишова Е.С. Исследование напряжённого состояния зубчатого венца на оптических моделях от сил зажима в самоцентрирующем патроне // Вестник Российского Университета Дружбы Народов. Серия: инженерные исследования. М.: Изд-во РУДН, 2015. С. 29-37.

13. Кошеленко А.С., Жедь О.В. Исследование методом фотомеханики напряженно-деформированного состояния зубчатого венца от сил зажима // Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения. М.: Издательство «Инновационное машиностроение», 2015. С. 227-231.

14. Рогов В.А., Кошеленко А.С., Хишова Е.С. Исследование методом фотомеханики напряженно-деформированного состояния зубчатого венца, вызванного зажимом в самоцентрирующем патроне при механической обработке // Вестник МГТУ «Станкин». М.: «СТАНКИН», 2015. №4 (35). С. 36-41.

15. Рогов В.А., Кошеленко А.С., Жедь О.В., Хишова Е.С. Исследование методом фотомеханики напряженно-деформированного состояния зубчатого венца, вызванного зажимом в самоцентрирующем патроне на этапах механической обработки // Грузовик №2, 2016. Москва: Издательство «Инновационное машиностроение», 2016. С. 19-22.

16. Рогов В.А., Кошеленко А.С., Хишова Е.С. Исследование методом фотомеханики напряженно-деформированного состояния зубчатого венца, вызванного зажимом в самоцентрирующем патроне при механической обработке // Технология машиностроения. Москва: Издательство «Технология машиностроения», 2016. №3 (165). С. 10-15.

17. O Zhed*, Koshelenko A., Khishova K. The effect of the stressed state of the ring gear due to interference with the base part in calculating the flexural strength of the tooth // IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 709. P. 022035-1 - 022035-8. DOI: 10.1088/1757 - 899X/709/2/022035.

18. Бердашев Р.С. Исследование технологических методов обеспечения точностных показателей качества термически упрочняемых зубчатых колес: магистерская диссертация (15.04.01) / Бердашев Роман Сергеевич; РУДН. Москва, 2014. 85 с.

19. Хишова Е.С. Исследование на оптических и математических моделях напряженно-деформированного состояния зубчатого венца в связи с конструкторско-технологическим обеспечением на этапах его производства: магистерская диссертация (15.04.05) / Хишова Екатерина Сергеевна; РУДН. Москва, 2016. 96 с.

20. Болотин Х.Л., Костромин Ф.П. Станочные приспособления. Издание пятое, переработанное и дополненное. М.: Машиностроение, 1973. 344 с.

21. Желаемое и действительное в методе конечных элементов. [Электронный ресурс] URL: www.cad.dp.ua (дата обращения: 15.03.2020).

Серков Александр Сергеевич, аспирант, Sanya_93@bk.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Масягин Василий Борисович, канд. техн. наук, профессор, Sanya_93@bk.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Серкова Любовь Борисовна, ассистент, lyubov_borisovna_omgtu@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE WORKPIECE GEAR ON MATHEMATICAL MODELS

A.S. Serkov, V.B. Masyagin, L.B. Serkova

The article considers the results of the study of a 3D model of a gear wheel by the finite element method (FEM) on the stress-strain state (VAT). The model is in static equilibrium from the action of the clamping forces of the self-centering Chuck Cams under various basing schemes. The novelty lies in the study of the effect of the clamping forces on the speed of the gear wheel under various basing schemes in 3 and 6-Cam cartridges. The results of the FEM are analyzed with the results obtained by a physical experiment (photomechanics). The adequacy of the obtained mathematical model is confirmed.

Key words: non-rigid gear blank, finite element method, mathematical modeling, mathematical model, 3D modeling, APM FEM, Compass 3D, stress-strain state (VAT).

Serkov Alexander Sergeevich, postgraduate, Sanya_93@bk.ru, Russia, Omsk, Omsk state technical University,

Masyagin Vasily Borisovich, candidate of technical sciences, professor, Sanya_93@bk.ru, Russia, Omsk, Omsk state technical University,

Serkova Lyubov Borisovna, assistant, lyubov_borisovna_omgtu@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk state technical University

УДК 621.793

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ С БОРИДНЫМИ, ЦИОНИРОВАННЫМИ И ГАЛЬВАНИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

В.Н. Гадалов, А.А. Иванов, И.А. Макарова, А.В. Филонович,
А.А. Калинин, А.Е. Гвоздев

Получены результаты экспериментальных исследований по оценке механических и эксплуатационных свойств конструкционных сталей с боридными, ционированными и гальваническими покрытиями.

Ключевые слова: сталь, боридные, цианированные, гальванические, покрытия, износостойкость, остаточные напряжения, трещины, термическая обработка.

Известно, что механические и эксплуатационные свойства промышленных сталей после упрочняющей химико-термической обработки оказывают решающее значение на ресурс деталей, изделий и конструкций, изготовленных из них. Данные вопросы исследованы в работах авторов [1-31].

Исследованиями установлено, что предел прочности борированных образцов на 20…25 % выше предела прочности стали 45 подвергнутых только термической обработке. Пластичные свойства стали 45 с борсодержащим слоем заметно понижаются на 30…35 %. Борирование железа и стали, как метод поверхностного упрочнения, позволяет получить твердость поверхности более высокую, чем после науглероживания или азотирования. Основной недостаток боридных слоев - хрупкость - устраняется введением в реакционную смесь небольшого количества меди, алюминия (окиси алюминия) и других металлов [2, 3, 13, 25].

Так микротвердость [5, 7, 15] и адгезионная прочность, определяемая методом царапания [32] борированной стали 45 в 2,2…2,5 раза выше, чем не борированной.

Износостойкость - это свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения. Она является одной из важнейших триботехнических характеристик. Износ деталей машин приводит к снижению прочности, понижению КПД, потере точности, увеличению динамических нагрузок, повышению шума, все это является следствием увеличения зазоров в сопряжениях. В связи с этим оценка уровня износостойкости после различных видов ХТО является актуальной задачей.

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований по износостойкости стали 45 после электролизного борирования, цианирования и гальванического электроосаждения покрытия на основе Ni - Mo. В качестве образцов использовались ролики из стали 45 диаметром 40 мм и шириной 12 мм. Все поверхности роликов до соответствующей ХТО имели параметр шероховатости Ra, равный 0,6…6,5 мкм.

В качестве оборудования для износостойкости использовали машину трения ИИ-5018, на которой осуществлялось трение ролика по ролику с фиксированным коэффициентом проскальзывания 15 ± 2 %. Контртелом являлись ролики из стали ШХ15, НКС50, рабочая поверхность которых имела выпуклость, описанную по радиусу, что позволило создавать высокие удельные нагрузки в зоне трения при максимально возможной нагрузке 2000 Н в механизме нагружения [2, 5, 7].

Испытания всех партий образцов проводились в режиме сухого трения.

Анализ зависимостей (рис. 1) свидетельствует, что образцы после электролизного борирования имеют более высокий уровень износостойкости, чем образцы после гальванического осаждения и цианирования.

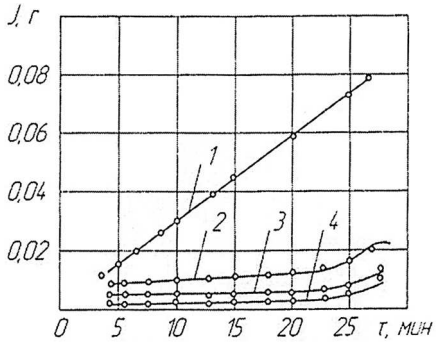


Рис. 1. Влияние технологии ХТО на износ образцов из стали 45: 1 - ролики после шлифования и полирования; 2 - после электроосаждения Ni- Mo; 3 - после цианирования; 4 - после электролизного борирования; 5 - после электролизного борирования, термическое улучшение

Установлено, что борирование стали 20 и 45 (без последующей закалки) незначительно на 15…18 % повышает ее предел выносливости на воздухе. В то же время было выявлено, что электролизное борирование с последующей закалкой существенно снижает усталостную прочность (рис. 2, 3) конструкционных сталей. У изотермически закаленной стали 40 предел выносливости после борирования на 38…42 % меньше, чем у неборированной.

Поверхностная закалка с нагревом токами высокой частоты (ТВЧ) в сравнении с объемной термической обработкой обеспечивает более высокий уровень усталостной прочности, но и при закалке с нагревом ТВЧ отрицательное влияние борирования не всегда устраняется. Наименьшее снижение усталостной прочности обеспечивается применением после борирования более сложной термической обработки. Это улучшение, упрочняющее сердцевину изделия и поверхностной закалки с нагревом ТВЧ, создающей благоприятное распределение остаточных напряжений. Как известно, по характеру распределения остаточных напряжений в покрытии можно судить об изменении вектора предела выносливости сталей до и после ХТО или термической обработки [2, 6, 15, 19].

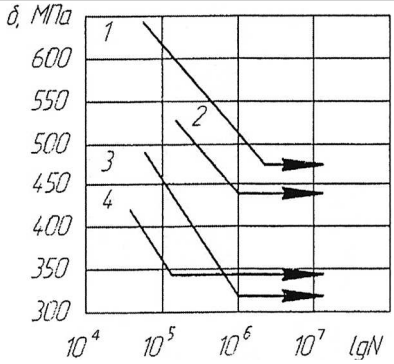


Рис. 2. Влияние борирования на усталостную прочность (симметричный знакопеременный изгиб), образцы Ø 7,52 мм: 1 - из стали 40Х, изотермическая закалка; 2 - из стали 45, улучшение; 3 - из стали 45, борирование, улучшение; 4 - из стали 40Х, борирование, изотермическая закалка

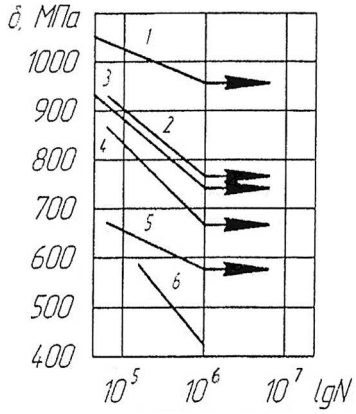


Рис. 3. Влияние ТО на усталостную прочность борированной стали (асимметричный знакопеременный изгиб), образцы Ø 20 мм: 1 - из стали 50, закалка с нагревом ТВЧ, отпуск при 350 °С; 2 - из стали 40Х, изотермическая закалка; 3 - из стали 40Х, борирование, закалка с нагревом ТВЧ отпуск при 470 °С; 4 - из стали 40Х, борирование, изотермическая закалка; 5 - из стали 50, закалка с нагревом ТВЧ, отпуск при 350 °С; 6 - из стали 50, борирование, закалка с нагревом ТВЧ отпуск при 350 °С

Различные виды поверхностной обработки, направленные на создание благоприятных остаточных напряжений и повышение качества поверхности, являются важным резервом повышения долговечности высоконагруженных деталей специальной техники.

На рис. 4-6 представлены исследования внутренних напряжений в покрытиях, полученных различными технологиями.

На рис. 4 показано изменение остаточных напряжений по толщине цементного слоя, определенного методом Северина [33] в хромистой нержавеющей стали 20Х13 в азотированных сталях остаточные напряжения ниже и составляют 500…700 МПа. На рис. 5 представлены зависимости величин остаточных напряжений от глубины карбонитридного слоя. Они свидетельствуют о том, что в процессе карбонитрации в поверхностных

слоях образцов возникают значительные сжимающие напряжения, распространяющиеся в сталях 4Х2В5ФМ, 6Х6В3СМФ, 8Х4В2С2ФМ, 4Х5ВФС на различную глубину. Максимальный уровень сжимающих остаточных напряжений до 50 МПа наблюдали у поверхности покрытий на стали 4Х2В5ФМ (рис. 5, кривая 1). У стали 3Х4М2ФС (рис. 5, кривая 3) уровень сжимающих напряжений у поверхности составлял 25 МПа. Максимум напряжений 20 МПа при карбонитрации стали 8Х4В2С2ФМ (рис. 5, кривая 2) сдвинут вглубь слоя на расстояние $5 \cdot 10^{-3}$ мм. Снижение значений остаточных напряжений по глубине карбонитридного слоя на стали 3Х4М2ФС (рис. 5, кривая 3) носит плавный характер; наблюдается постоянное их снижение до нуля на глубине 50 мкм с последующим переходом на границе раздела покрытия подложка в растягивающие напряжения. У сталей 4Х2В5ФМ и 8Х4В2С2ФМ (с менее развитым карбонитридным слоем) понижение остаточных напряжений по глубине слоя более резкое снижение их до нуля наблюдали на меньшей глубине, после чего переходила в растягивающее напряжение незначительной величины (рис. 5, кривые 1 и 2).

Есть мнение, что формирование слоя сопровождается релаксацией напряжений и снижением их уровня в карбонитридном слое, в том числе из-за развития в нем окислительных процессов.

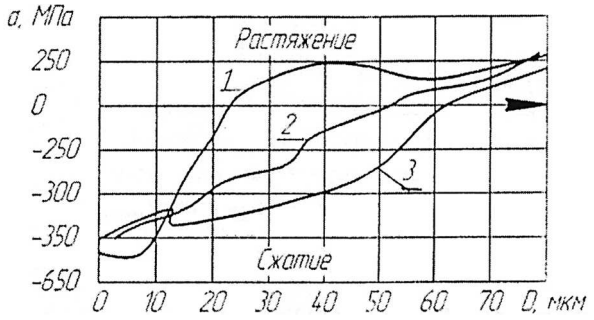


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений по сечению диффузионных слоев цементованной стали 20Х13 после цементации 5 ч.: 1 - при 900 °С; 2 - при 950 °С; 3 - при 1000 °С

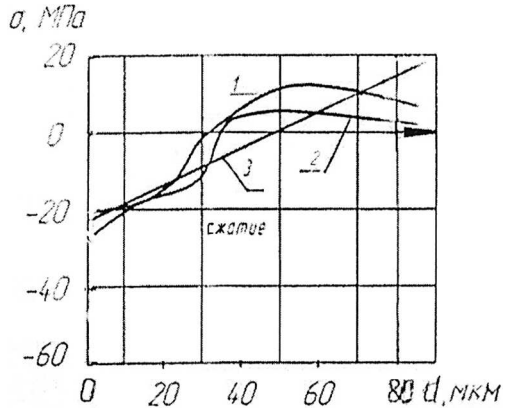


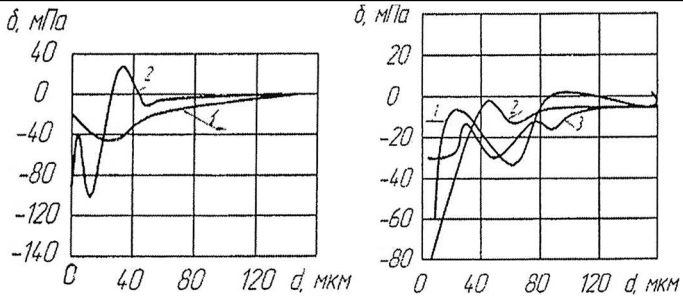
Рис. 5. Зависимость величины напряжений от глубины карбонитридного слоя, полученного на сталях марки 4Х2В5ФМ (1), 8Х4В2СФМ (2) и 3Х4М2ФС (3)

Скопление в карбонидном слое сложных нитридных, карбонитридных и карбидных фаз и повышение в нем азота и углерода может способствовать развитию значительных внутренних напряжений на его поверхности.

Вероятно, повышение износостойкости карбонитридного инструмента из штамповых сталей в значительной мере можно связывать с наличием максимума величины сжимающих напряжений в карбонитридном слое.

На рис. 6 показано распределение остаточных напряжений в борированной стали 45 и 40Х. После борирования в диффузионном слое (на всю глубину зоны боридов) создаются остаточные напряжения сжатия, максимум которых соответствует зоне с боридом F_2B, обладающим большим удельным объемом, чем FeB. После термической обработки борированной стали дополнительное влияние тепловых и структурных напряжений, связанных с фазовыми превращениями в сердцевине и переходной зоне, приводит к существенному перераспределению остаточных напряжений. Появление после ТО растягивающих напряжений вблизи поверхности является одной из причин отрицательного влияния борирования на усталостную прочность термически обработанной стали, но сопоставление кривых усталости (рис. 2, 3) с распределением остаточных напряжений, представленных на рис. 6, показывает, что последние не являются основным фактором, определяющим выносливость борированной стали. Считается, и мы это поддерживаем, что снижение усталостной прочности в результате борирования с последующей ТО в первую очередь обусловлено возникновением тонких трещин в борированном слое, которые, являясь концентраторами напряжений, служат очагами разрушения. Трещины в поверхностном слое образуются при охлаждении после борирования и в процессе последующей ТО вследствие большого различия в коэффициентах линейного расширения сердцевины и слоя и очень малой пластичности последнего. При поверхностной закалке с нагревом ТВЧ во всем борированном слое образуются высокие остаточные напряжения сжатия (рис. 6), которые уменьшают величину растягивающих напряжений в местах их концентрации, в частности, у стенок трещин. Из-за постоянно действующих остаточных напряжений сжатия процесс развития микротрещин, имеющихся в борированном слое в исходном состоянии тормозится и начинает проявляться при больших рабочих напряжениях, чем при обычной закалке. Проведенные нами металлографические исследования развития трещин в борированном слое в процессе усталостных испытаний при закалке с нагревом током высокой частоты и при объемной закалке подтверждают вышесказанное.

Таким образом, противоположные влияния борирования на выносливость стали при проведении последующей термической обработки и без нее может быть обусловлено разным распределением остаточных напряжений, характером распределения и действием в упрочненном слое микротрещин.



а *б*

Рис. 6. Распределение остаточных напряжений в борированном слое стали 45 (а) и 40Х (б): 1 - без ТО; 2 - термическое улучшение; 3 - закалка с нагревом ТВЧ

Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих технологий обработки конструкционных и инструментальных сталей с применением новых нанокомпозиционных покрытий и смазок [34-51].

Работа подготовлена в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России №11.6682.2017/8.9.

Список литературы

1. Гадалов В.Н., Сафонов С.В., Петренко В.Г. Повышение эксплуатационных характеристик титановых сплавов из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием. М.: АРГАМАК-МЕДИА, 2018. 136 с.

2. Гадалов В.Н., Макарова И.А., Ляхов А.В. Перспективные процессы химико-термической обработки конструкционных сталей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. Вып. 12. С. 567 - 575.

3. Гадалов В.Н., Емельянов С.Г., Макарова И.А. Диффузионное борирование доэвтектоидных инструментальных сталей. Технологии, структуры, фазовые составы и свойства материалов // Вестник машиностроения. 2018. №6. С. 60-66.

4. Гадалов В.Н., Филонович А.В., Макарова И.А. Исследование и разработка методов повышения надежности и работоспособности деталей ЦПГ дизелей многофункциональными покрытиями // Автомобильная промышленность. 2018. №6. С. 27-30.

5. Гадалов В.Н., Скрипкина Ю.В., Горожанкин В.В. Технология конструкционных материалов и материаловедение сварки: учебное пособие. Курск: ООО «Учитель». 2018. 225 с.

6. Гадалов В.Н., Петренко В.Г., Ляхов А.В. Химико-термическая и электрофизическая обработка сплавов и покрытий. М.: АРГАМАК-МЕДИА. 2017. 388 с.

7. Гадало В.Н., Романенко Д.Н., Сафонов С.В. Материаловедение: учебник для вузов. М.: АРГАМАК - МЕДИА: ИНФРА-М., 2016. 336 с.

8. Гадалов В.Н., Винокуров О.В., Савельев В.И. Изучение быстрозакристаллизованных порошков из отходов титановых сплавов ОТ4 и ВТ20 после электроимпульсной обработки // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. №11. С. 42-46.

9. Гадалов В.Н., Филонович А.В., Ворначева И.В. Использование электроэрозионных порошков в композиционных электрохимических покрытиях при упрочнении и восстановлении деталей машин // Известия Юго-западного государственного университета. Серия. Техника и технология. Курск, 2016. №2(19). С. 40-45.

10. Гадалов В.Н., Серебровский В.И., Ворначева И.В. Повышение работоспособности и качества коленчатых валов восстановленных газоплазменным напылением и ультразвуковой обработкой // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2016. №6. С. 8-10.

11. Гадалов В.Н., Гвоздев А.Е., Ворначева И.В. Применение износостойких минералокерамических и твердосплавных индентеров для повышения надежности и качества деталей // Вестник машиностроения. 2016. №6. С. 63-66.

12. Гадалов В.Н., Ковалев С.В., Абакумов А.В. Повышение работоспособности и надежности цилиндрической втулки локомотивного дизеля аморфизированными газотермическими покрытиями из сплава Fe7Crl 1P12C7 // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. №4(36). С. 4-29.

13. Гадалов В.Н., Борсяков А.С., Ляхов А.В. Диффузионные боридные покрытия на железе, сталях и сплавах с альбомом фотографий // Verbag / ГАР LAMBERT. Academic Publishing isreinjmprint der. Германия. 2015. 150 р.

14. Гадалов В.Н., Романенко Д.Н., Абакумов А.В. Влияние содержания карбидов в цементованных слоях на способность самозатачивания бурового инструмента // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2014. №8. С. 47-50.

15. Гадалов В.Н., Сафонов С.В., Романенко Д.Н. Материаловедение: учебник. М.: АРГАМАК - МЕДИА: ИНФРА-М., 2014. 272 с.

16. Гадалов В.Н., Сафонов С.В., Сальников В.Г. Повышение эксплуатационной надежности и качества тяжелонагруженных деталей // Труды ГОСНТИ. 2013. Том 112. Ч. 1. С. 140-144.

17. Гадалов В.Н., Сальников В.Г., Романенко Д.Н. Повышение износостойкости режущего инструмента способом конденсации вещества в вакууме ионной бомбардировкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. №1. С. 21-25.

18. Гадалов В.Н., Сальников В.Г., Ляхов А.В. Оптимизация режимов нанесения ионновакуумного покрытия TiN для повышения его работоспособности // Сварочное производство. 2012. №3. С. 48-50.

19. Гадалов В.Н., Сальников В.Г., Агеев Е.В. Металлография металлов, порошковых материлов и покрытий, полученных электроискровыми способами: монография. М.: ИНФРА-М. 2011. 468 с.

20. Гадалов В.Н., Сальников В.Г., Романенко Д.Н. Износостойкие покрытия для режущего инструмента (состояние и перспективы развития) // Технология машиностроения. 2011. №7. С. 26-27.

21. Гадалов В.Н., Романенко Д.Н., Григорьев С.Б. К вопросу оптимизации технологии электрофизической обработки шарикоподшипниковых и инструментальных сталей // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2011. №2. С. 62-67.

22. Гадалов В.Н., Шеставина С.В., Матвеев А.С. Изучение диффузии водорода в никелевых анодах отпаянных вакуумных приборов // Материаловедение. 2011. №3. С. 13-17.

23. Гадалов В.Н., Романенко Д.Н., Николенко А.В. Повышение ресурса работы оснастки и инструмента // Технология машиностроения. 2010. №12. С. 22-25.

24. Гадалов В.Н., Лыткин А.И., Алехин Ю.Г. Использование импульсного лазерного облучения для упрочнения штампов холодного деформирования // Заготовительное производство в машиностроении. 2010. С. 19-20.

25. Романенко Д.Н., Гадалов В.Н., Самойлов В.В. Исследование кинетики при формировании боридных покрытий на железе // Межд. журнал экспериментального образования. 2010. №9. С. 87-88.

26. Гадалов В.Н., Шишков А.С. Диффузионная сварка слоистых титано-алюминиевых панелей // Технология металлов. 2009. №10. С. 28-31.

27. Гадалов В.Н., Матвеев А.С., Григорьев С.Б. Ресурсосберегающие технологии производства слоистых материалов // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. №10. С. 35-36.

28. Емельянов С.Г., Лукашев Е.А., Олейник А.В. Комплекс технологий нанесения многофункциональных покрытий для повышения работоспособности деталей машин // Технология машиностроения. 2009. №9. С. 33-35.

29. Гадалов В.Н., Емельянов С.Г., Романенко Д.Н. Применение электроакустического напыления для упрочнения и восстановления деталей машин и инструмента // Сварщик. Киев, 2008. №1. С. 26-29.

30. Гадалов В.Н., Камышников Ю.П., Романенко Д.Н. Локальное избирательное нанесение электрофизических покрытий на металлообрабатывающий инструмент // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. №4. С. 33-36.

31. Гадалов В.Н., Серебровский В.И., Емельянов С.Г. Химико-термическое упрочнение электроосажденых сплавов на основе железа // Технология металлов. 2008. №2. С. 37-40.

32. Гадалов В.Н., Бредихина О.А., Скрипкина Ю.В. Использование методом склерометриии для оценки металлов и сплавов с электрофизическими покрытиями // Сб. «Новые материалы и технологии в машиностроении». Брянск: БГИТА, 2006. Вып. 6. С. 10-15.

33. Гадалов В.Н., Григорьев С.Б., Самойлов В.В. Методика исследования внутренних напряжений в покрытиях по методу М.М. Северина // Сб. Материалы и упрочняющие технологии. 2009. Курск: Курский государственный технический университет. 2009. Ч. 1. С. 120-123.

34. Бреки А.Д., Кольцова Т.С., Скворцова А.Н., Толочко О.В., Александров С.Е., Лисенков А.А., Провоторов Д.А., Сергеев Н.Н., Малий Д.В., Сергеев А.Н., Агеев Е.В., Гвоздев А.Е. Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе алюминия, упрочненных углеродными нановолокнами, при трении по стали 12Х // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. № 4 (21). С. 11 – 23.

35. Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е. Пластическая дилатансия и деформационная повреждаемость металлов и сплавов: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 114 с.

36. Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е. Обработка сталей и сплавов в интервале температур фазовых превращений: монография. Изд-во ТулГУ, 2016. 320 с.

37. Медведева В.В., Бреки А.Д., Крылов Н.А., Фадин Ю.А., Стариков Н.Е., Гвоздев А.Е., Александров С.Е., Сергеев А.Н., Провоторов Д.А., Малий Д.В. Исследование изнашивания стали ШХ15 в среде пластичных смазочных композиционных материалов, содержащих дисперсные частицы слоистого модификатора трения // Технология металлов. 2016. № 7. С. 9 – 15.

38. Бреки А.Д., Диденко А.Л., Кудрявцев В.В., Васильева Е.С., Толочко О.В., Гвоздев А.Е., Сергеев Н.Н., Провоторов Д.А., Стариков Н.Е., Фадин Ю.А., Колмаков А.Г. Композиционные покрытия на основе полиимида А-ООО и наночастиц WS_2 с повышенными триботехническими характеристиками в условиях сухого трения скольжения // Материаловедение. 2016. № 5. С. 41 – 44.

39. Кондрашина А.В., Кузовлева О.В., Гвоздев А.Е. Деформация, структурообразование и разрушение стали Р6М5 // Деформация и разрушение материалов. 2007. № 8. С. 11 – 16.

40. Кузовлева О.В., Гвоздев А.Е. О закономерностях и причинах изменения пластичности металлов и сплавов в состоянии предпревращения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Вып. 5. Ч. 3. С. 94 – 103.

41. Макаров Э.С., Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М. Теория пластичности дилатирующих сред: монография / под. ред. проф. А.Е. Гвоздева. 2-е изд. перераб. и доп. Тула: Издательство ТулГУ, 2015. 337 с.

42. Гвоздев А.Е., Колмаков А.Г., Кузовлева О.В., Сергеев Н.Н., Тихонова И.В. Механические свойства конструкционных и инструментальных сталей в состоянии предпревращения при термомеханическом воздействии // Деформация и разрушение материалов. 2013. № 11. С. 39 – 42.

43. Селедкин Е.М., Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е., Сергеев Н.Н., Калинин А.А., Малий Д.В. Моделирование ресурсосберегающих процессов обработки металлов и сплавов: монография. Тула: Издательство ТулГУ, 2016. 204 с.

44. Гвоздев А.Е., Колмаков А.Г., Боголюбова Д.Н., Сергеев Н.Н., Тихонова И.В., Провоторов Д.А. Особенности протекания процессов разупрочнения при горячей деформации алюминия, меди и их сплавов // Материаловедение. 2014. № 76. С. 48 – 55.

45. Гвоздев А.Е., Сергеев Н.Н., Минаев И.В., Колмаков А.Г., Тихонова И.В., Сергеев А.Н., Провоторов Д.А., Хонелидзе Д.М., Малий Д.В., Голышев И.В. Распределение температур и структура в зоне термического влияния для стальных листов после лазерной резки // Материаловедение. 2016. № 9. С. 3 – 7.

46. Шоршоров М.Х., Гвоздев А.Е., Афанаскин А.В., Гвоздев Е.А. Расчет кластерной структуры расплава, ее влияние на образование нано-аморфных твердых фаз и их структурную релаксацию при последующем нагреве // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 6. С. 12 – 16.

47. Шоршоров М.Х., Гвоздев А.Е., Головин С.А. Условия проявления сверхпластичности порошковых быстрорежущих сталей // Материаловедение. 1998. № 6. С. 42 – 47.

48. Gvozdev A.E., Minaev I.V., Sergeev N.N., Kolmakov A.G., Provotorov D.A., Tikhonova I.V. Grain size effect of austenite on the kinetics of pearlite transformation in low-and medium-carbon low-alloy steels // Inorganic Materials: Applied Research. 2015. Т. 6. № 1. P. 41 – 44.

49. Gvozdev A.E. Alternative technology of thermomechanical treatment of high-speed tungsten-molybdenum steel R6M5 // Metal Science and Heat Treatment. 2005. Т. 47. № 11-12. P. 556 – 559.

50. Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Minaev I.V., Tikhonova I.V. Role of nucleation in the development of first-order phase transformations // Inorganic Materials: Applied Research, 2015. Vol.6. №4. P. 283 – 288.

51. Калинин М.М., Калинин А.М., Калинин А.А., Гвоздев А.Е. Изобретательство, экология, ресурсосбережение: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 494 с.

Гадалов Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Gadalov-VN@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Иванов Александр Андреевич, аспирант, alekzenderroll@gmail.com, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Макарова Ирина Александровна, аспирант, makarova.mia@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Филонович Александр Владимирович, д-р техн. наук, профессор, filon8@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Калинин Антон Алексеевич, инженер, antony_ak@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Гвоздев Александр Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, gwozdew.alexandr2013@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого

EVALUATION OF MECHANICAL AND OPERATIONAL PROPERTIES OF STRUCTURAL STEELS WITH BORIDE, ZIONED AND GALVANIC COATINGS

V.N. Gadalov, A.A. Ivanov, I.A. Makarova, A.V. Filonovich, A.A. Kalinin, A.E. Gvozdev

The results of experimental studies on the assessment of the mechanical and operational properties of structural steels with boride, alloyed and galvanic coatings are presented.

Key words: steel, boride, cyanide, galvanic, coverings, wear resistance, residual stresses, cracks, heat treatment.

Gadalov Vladimir Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, Gadalov-VN@yandex.ru, Russia, Kursk, Southwestern State University,

Ivanov Alexander Andreevich, postgraduate, alekzenderroll@gmail.com, Russia, Kursk, Southwestern State University,

Makarova Irina Aleksandrovna, postgraduate, makarova.mia@yandex.ru, Russia, Kursk, Southwestern State University,

Filonovich Alexander Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, filon8@yandex.ru, Russia, Kursk, Southwestern State University

УДК 621.7.075

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ГОФРИРОВАННЫХ ЛЕНТ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Ю.В. Щипкова

Важной задачей при проектировании и эксплуатации теплообменников является обеспечение точности производства каждого составляющего элемента. В данной работе рассмотрены способы изготовления гофрированных лент, используемых в работе теплообменников. Проведен анализ существующих способов и сделан вывод о необходимости усовершенствования существующих методов.

Ключевые слова: штамповка, накатывание, гофрированная лента, теплообменник, профиль.

Теплообменник – техническое устройство, работающее на принципах теплообмена между двумя средами, имеющими разные температуры. Данные устройства используются во многих отраслях производства: нефтепереабатывающей и нефтехимической [1, 2], холодильной [3], энергетической и бытовой. Например, в статье [4] описывается выбор рациональной конструкции теплообменника индивидуального дыхательного аппарата, что подтверждает важность и широкое распространение данного устройства во всех областях жизнедеятельности человека.

Конфигурации устройства могут отличаться, однако, по принципу работы выделяют рекуператоры (теплоносители разделены стенкой) (рис. 1) [5] и регенераторы (контакт холодной и горячей среды с одной и той же поверхностью происходит поочередно) (рис. 2) [6].

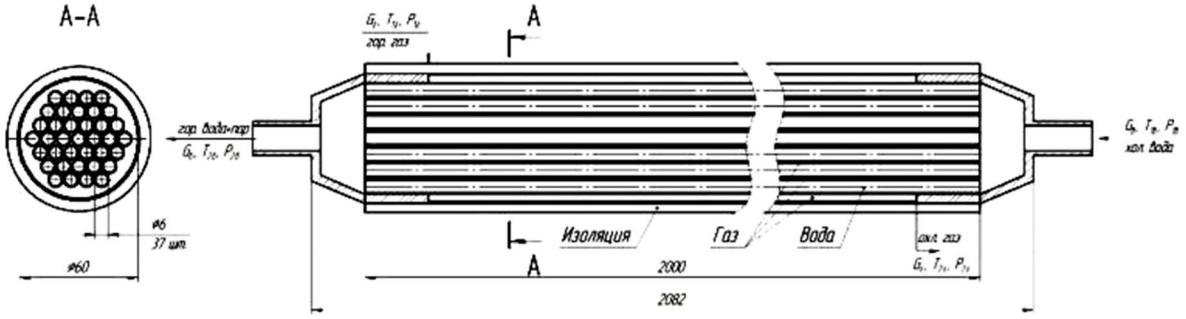


Рис. 1. Схема рекуперативного теплообменного аппарата

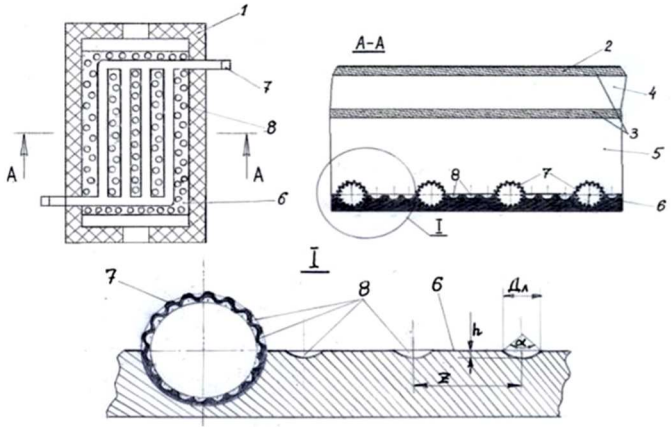


Рис. 2. Схема регенеративного теплообменного аппарата:
1 – изоляция; 2, 3 – стекло; 4 – вакуум; 5 – проход воздуха;
6 – солнцевоспринимающая поверхность; 7 – трубки;
8 – сферические интенсификаторы

В свою очередь, регенеративные теплообменники разделяются на три метода по способу регенерации тепла: для стационарных систем, для систем с циклической работой и для систем с твердотельными функциональными материалами. В статье [7] рассмотрены основополагающие принципы и уточнены общие черты и основные отличия методов регенерации для различных типичных технологий охлаждения.

Одним из основных конструктивных элементов регенеративных теплообменников является гофрированная лента, из которой изготавливаются насадки нагревателя [8]. Наличие гофры объясняется увеличением площади контакта среды с лентой, что позволяет увеличить теплоотдачу. Ленты могут быть изготовлены из алюминия и нержавеющей стали. У алюминия достаточно высокая теплоотдача [9], но, его использование при высоких температурах работы нецелесообразно. Нержавеющая сталь с легирующими элементами – хром и никель – обладает высокой термостойкостью и хорошей теплоотдачей. Однако, использование этого материала усложняет процесс изготовления ленты.

В настоящее время, основными способами изготовления гофрированных лент из нержавеющей стали являются штамповка и накатывание.

Процесс формообразования изделия применительно к обработке поверхностей резанием или штамповкой – это процесс взаимодействия двух сопряженных поверхностей – детали и инструмента. Такое формообразование осуществляется при определенных относительных движениях инструмента и заготовки. Эти движения определяют кинематические схемы резания. Они основаны на сочетаниях прямолинейно-поступательного и вращательного движений. В зависимости от количества таких движений в кинематической схеме резания осуществлена их классификация по группам [10, 11].

Одним из основных методов механической обработки заготовок деталей является метод обкатки. Он заключается в придании инструменту или заготовке движения по траектории, определяемой соответствующей кинематической схемой. Метод обкатки в своей основе использует принцип работы зубчатого зацепления. Его элементами применительно к формообразованию являются инструмент и заготовка. Боковые стороны зубьев детали образуются как огибающие последовательных положений режущей кромки зуборезного инструмента. Режущие кромки инструмента имеют профиль зуба инструментальной рейки или долбяка. [12]

Частным случаем метода обкатки является метод центроидного огибания. Он характеризуется тем, что в процессе формообразования детали инструментом центроиды инструмента и обрабатываемого колеса катятся друг по другу без скольжения. Профиль детали получается, как огибающая различных положений режущих кромок инструмента. Центроидами в этих случаях являются прямая и окружность. Так при обработке цилиндрического колеса инструментальной рейкой центроидой детали является окружность, а инструмента – прямая. При обработке колеса долбяками центроидами являются две окружности, при обработке рейки долбяком центроидами являются прямая и окружность [13].

При накатывании заготовку подают между накатными роликами, имеющими на рабочих поверхностях рифления, профиль и расположение которых приближенный к накатываемому профилю (рис. 3) [14].

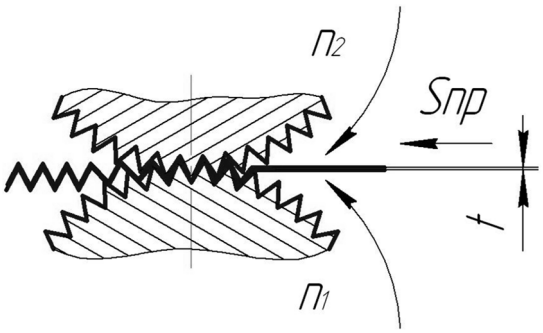


Рис. 3. Схема накатывания ленты

Штамповка – образование или изменение углов между частями заготовки или придание ей криволинейной формы (рис. 4).

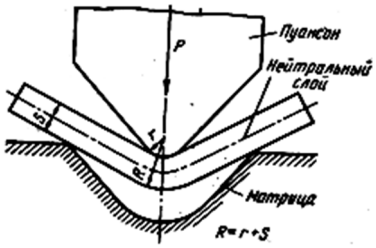


Рис. 4. Схема процесса штамповки: P – усилие гибки; R и r – наружный и внутренний радиусы гибки; s – толщина материала

В месте изгиба слои металла, расположенные с внутренней стороны, сжимаются, а слои металла, расположенные с наружной стороны, растягиваются в продольном направлении. В поперечном направлении наблюдается обратная картина. Поэтому в месте изгиба форма поперечного сечения нешироких и достаточно толстых полос искажается.

Штамповка осуществляется в результате упругопластической деформации, при которой пластической деформации металла предшествует значительная упругая деформация. В результате упругой деформации растянутые и сжатые слои стремятся возвратиться в исходное положение. Вследствие этого, форма детали после штамповки не будет соответствовать форме штампа на величину угла упругой деформации, который необходимо учитывать при изготовлении инструмента (штамповой оснастки) [15].

Существует большое количество различных технологий штамповки листовых изделий. Выбор оптимального зависит от множества условий, таких как: параметры получаемого изделия, источник используемой энергии и т.д. В зависимости от источника энергии, используемой для осуществления процесса штамповки, различают: штамповка сжиженным газом, пороховыми газами, газодетанационная штамповка, газоимпульсная штамповка, штамповка продуктами сгорания газовых смесей [16–18].

В статье [19] проведен обзор существующих методов холодной штамповки листовых заготовок и сделан вывод о том, что представленные методы недостаточно эффективны ввиду сложности технологического процесса, сложности технологической оснастки, а так же высокой стоимости самого оборудования.

В таблице приведены преимущества и недостатки двух рассматриваемых методов обработки деталей.

Каждый из рассмотренных методов обладает своими недостатками, значимость которых можно уменьшить. Например, для повышения точности изготовления ленты методом штамповки, применяют устройство прижимающее заготовку к пуансону и предотвращающие ее возможное смещение.

Увеличить производительность можно путем организации автоматической подачи заготовки из рулонной ленты (рис. 6) [20].

Сравнительный анализ достоинств и недостатков методов изготовления деталей

Оценка	Штамповка	Накатывание
Достоинства	- возможность изготовления легких, жестких и прочных тонкостенных деталей простой или сложной формы, которые сложно получить другими способами; - практически полная взаимозаменяемостью деталей, полученных листовой штамповкой; - широкие возможностями автоматизации (роботизации) либо механизации производственных процессов; - высокая производительность и коэффициент использования металла и низкие трудозатраты	- очень высокая производительность; - низкая стоимость обработки; - высокое качество обработанных деталей; - возможность непрерывного изготовления детали требуемой длины
Недостатки	- с увеличением ширины заготовки в зоне растяжения увеличиваются осевые (аксиальные) растягивающие напряжения, в связи с чем снижается пластичность металла; - появление седловины в зоне изгиба (рис. 5); - появление трещин в центре детали; - сложность в изготовлении и наладке штампов	- большая вероятность возникновения пружинения металла

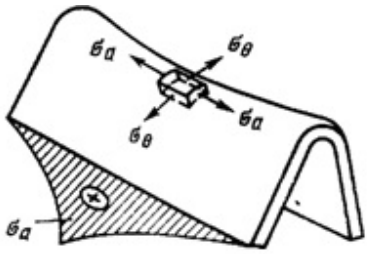


Рис. 5. Схема распределения тангенциальных напряжений при штамповке: σ_a – осевые (аксиальные) растягивающие напряжения

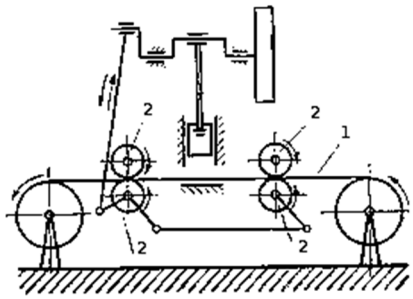


Рис. 6. Устройство для автоматической подачи ленты: 1 – рулонная лента; 2 – валковая подача

Таким образом, можно сделать вывод, что изготовление ленты регенеративного теплообменника – процесс сложный и энергозатратный. Существующие методы не могут полностью обеспечить точность изготовления и требуют доработок.

Список литературы

1. Гоглев И.Н., Логинова С.А., Румянцева В.Е., Разговоров П.Б. К вопросу использования спирально-витых теплообменников на химических и нефтеперерабатывающих заводах российской федерации // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности. 2019. С. 56-60.

2. Jokar S.M., Rahimpour M.R., Shariati A. Heat exchanger application for environmental problem-reducing in flare systems of an oil refinery and a petrochemical plant: Two case studies // Applied Thermal Engineering. 2016. Т. 106. P. 796-810.

3. Bakhshipour S., Valipour M. S., Pahamli Y. Parametric analysis of domestic refrigerators using PCM heat exchanger // International journal of refrigeration. 2017. Т. 83. P. 1-13.

4. Гудков С.В., Филатова Е.Ю., Туголуков Е.Н., Алексеев С.Ю., Романенко А.В. Выбор рациональной конструкции регенеративного теплообменника для использования в системе автоматизированного проектирования индивидуальных дыхательных аппаратов // Вопросы современной науки и техники. Университет им. ВИ Вернадского. 2006. №. 2. С. 4.

5. Чернов Г.И., Юша В.Л., Калашников А.М. Параметрический анализ эффективности экранно-вакуумной теплоизоляции рекуперативного теплообменника системы рекуперации тепловых потерь мобильной компрессорной установки // Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение». 2019. Т. 3. С. 57 – 65.

6. Серебряков Р.А., Батухтин С.Г. Регенеративный водовоздушный теплообменник // Вестник ВИЭСХ. 2016. №. 1. С. 84-89.

7. Qian S., Yu J., Yan G. A review of regenerative heat exchange methods for various cooling technologies // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Т. 69. P. 535-550.

8. Лакиза М.В. Интенсификация теплообмена в трубном пространстве гофрированными ленточными вставками с надрезами // Морские интеллектуальные технологии. 2017. Т. 1. №. 1. С. 39-42.

9. Marțian V. et al. Heat transfer and hydraulic performance models for a family of aluminum plate heat exchanger with transversal offset strip fins // Experimental Heat Transfer. 2017. Т. 30. №. 6. P. 530-543.

10. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: учебник для машиностр. и приборостр. спец. Вузов. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.

11. Лашнев С.И., Юликов М.И. Расчет и конструирование металлорежущих инструментов с применением ЭВМ. М.: Машиностроение, 1975. 392 с.

12. Тихонов А.А. Моделирование процесса нарезания нулевых и корригированных зубчатых колес с эвольвентным профилем // Синергия Наук. 2018. №. 20. С. 274-278.

13. Ляшков А.А., Рейнгард А.Я. Разработка компьютерных 3d-моделей зубчатых изделий и релизация их средствами современных технологий обработки // Ученые Омска-региону. 2019. С. 138-142.

14. Назаров П.В., Черных И.К., Бугай И.А., Васильев И.А., Васильева М.В., Матузко Е.Н. Проектирование приспособления для накатывания ломаного углового профиля // Омский научный вестник. 2017. №. 1 (151). С. 34 – 37.

15. Попов А.Ю., Реченко Д.С., Евдокимова О.П., Ляшков А.А. Исследование напряженно-деформированного состояния ребренных элементов кауперной насадки, полученных методами ластического деформирования // Ученые Омска-региону. 2016. С. 87-92.

16. Байрамуков, Р.А. Устройство для листовой штамповки взрывом газовых смесей // Актуальные проблемы современной науки: состояние, тенденции развития: сборник материалов I Всероссийской научно-практической конференции. Черкесск: БИЦ СевКавГГТА, 2017. С. 172-176.

17. Малсугенов Р.С. Разработка, создание и испытание устройства для газовой штамповки с противодавлением // Развитие технических наук в современном мире. Сборник научных трудов по итогам международной научнопрактической конференции. Воронеж, 2015. С. 31 – 35.

18. Botashev A.Y., Bisilov N.U., Malsugenov R.S. Development of Methods and Equipment for Sheet Stamping // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2018. Т. 327. №. 4. P. 042020.

19. Кочкаров И.С., Байрамуков Р.А. Обзор устройств и методов штамповки листовых заготовки // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство. 2019. С. 81-87.

20. Степанов В.А., Доронин В.И., Шуйцев А.М. РТО Учебный видеофильм Холодная штамповка // Навигатор в мире науки и образования. 2016. №. 2. С. 427-434.

Щипкова Юлия Владимировна, аспирант, ylia_sipkova@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

ANALYSIS OF MANUFACTURING METHODS FOR STEEL CORRUGATED BELTS OF REGENERATIVE HEAT EXCHANGER

Yu.V. Shchipkova

An important task in the design and operation of heat exchangers is to ensure the accuracy of production of each component element. In this paper, the methods of manufacturing corrugated belts used in the operation of heat exchangers are considered. The analysis of existing methods is carried out and the conclusion is made about the need to improve existing methods.

Key words: stamping, rolling, corrugated tape, heat exchanger, profile.

Shchipkova Yulia Vladimirovna, postgraduate, ylia_sipkova@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 621.357.6

УСТАНОВКА СКОРОСТНОГО ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

А.А. Гладун

Проанализированы условия получения гальванических осадков с высокой скоростью осаждения. Рассмотрена конструкция установки гальванического осаждения СГОМ-1. Приведены схемы нанесения гальванических покрытий на поверхности различной формы. Определены условия осаждения сплавов Ni - Co на сложные поверхности с высокой скоростью.

Ключевые слова: скоростное гальваническое осаждение, гальванопластика, пресс-форма, электролизер.

Гальванопластика широко применяется в промышленности для изготовления прецизионных сит, волноводов, сопел, пресс-форм, зеркал и других изделий. Гальванокопии повторяют мельчайшие элементы поверхности моделей любой формы, можно тиражировать их для получения партий деталей с уникальными свойствами [1, 2].

Толщина получаемых копий составляет от десятков микрометров до десятков миллиметров. Скорость гальванического осаждения металлов и сплавов определяется величиной катодной плотности тока и соответствующей ей величиной выхода металлов по току. Основными факторами, влияющими на рабочие плотности тока, являются состав электролита, температура электролиза, гидродинамические условия в электролизере и характеристики технологического тока. При прочих равных условиях решающее влияние на получение качественных осадков оказывают диффузионные ограничения, возникающие в прикатодном слое.

Среди способов повышения скорости осаждения металлов в гальванических установках наиболее часто применяют следующие способы: барботирование электролита воздухом, вращение, возвратно - поступательное перемещение модели – катода, подача электролита в зону осаждения под давлением. Наиболее эффективным для снятия диффузионных ограничений является создание в прикатодной области режима турбулентного течения электролита.

Для изготовления деталей методом гальванопластики используется два вида оборудования – гальванические ванны и специализированные установки, предназначенные для однотипных деталей. Гальванические ванны не применяются для процессов скоростного осаждения металлов. В них отсутствует возможность быстрой переналадки системы подающих электролит сопел и дополнительных анодов, экранов, которая зависит от конфигурации получаемых деталей, ограничен выбор кинематики перемещения модели в ходе осаждения.

В установках для скоростной гальванопластики применяются следующие основные схемы обработки: осаждение с эквидистантным анодом, использование анода дискретно профилирующей формы, осаждение с

непрофлированным анодом, значительно удаленным от катодной поверхности. Особенностями первых двух схем является обработка на небольших межэлектродных зазорах порядка 1…5 мм. Благодаря этому создаются хорошие условия для распределения электрического поля и гидродинамического течения электролита. Однако для осаждения на поверхности сложной формы такие схемы мало подходят.

В ТулГУ разработана и изготовлена установка СГОМ – 1, предназначенная для исследования и отработки процессов скоростного гальванического осаждения металлов, получения копий с площадью рабочей поверхности до 300 см^2 [3].

Установка имеет модульный принцип компоновки и состоит из ванны с электролитом, на которой установлена быстросъемная камера – электролизер с приводом перемещения модели – катода. На рис. 1 показан внешний вид установки.

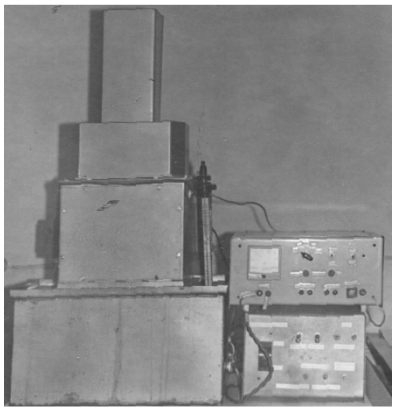


Рис. 1. Установка СГОМ-1

При проектировании установки учитывалось, что для наращивания достаточно больших деталей типа корпусов площадью до 300 см^2 или протяженных деталей длиной до 500 мм, достаточно объема рабочей камеры в 20…25 л при условии, что подготовка электролита (нагрев, очистка, забор в насосную установку будет осуществляться в отдельной ванне. Это позволило получить небольшие размеры рабочей камеры и установки в целом.

В ванне объемом 50 л, изготовленной из титана, размещена ячейка селективного электролиза для выделения примесей металлов из электролита, фильтр с активированным углем, нагревательные элементы. Температура поддерживается с точностью 1^{o}С. Установка комплектуется двумя трехступенчатыми центробежными насосами, выполненными из титана, фторопласта и винипласта. Конструкция насоса специально разработана для работы в условиях гальванического производства (рис. 2).

Электролизер, изготовленный из титана, состоит из камеры со съемными стенками, в которой размещены основные аноды плоской формы и сопла для подачи электролита. В конструкции электролизера предусматривается возможность изменения расположения и количества электролитоподающих сопел, установки дополнительных электродов, экранов и приспособлений. Рабочая камера заполняется электролитом только непо-

средственно при проведении процесса гальванического осаждения, что облегчает монтаж приспособлений и электродов в ней, дает возможность их точно установить.

Для создания необходимых перемещений в процессе электролиза разработан универсальный привод (рис. 3), совмещающий вращение и возвратно-поступательное движение в вертикальной и горизонтальной плоскостях. При необходимости он легко заменяется на другой, обеспечивающий иную кинематику перемещения, в зависимости от формы, размеров и количества моделей, выбранной схемы осаждения. Привод после установки на ванну закрывается кожухом.

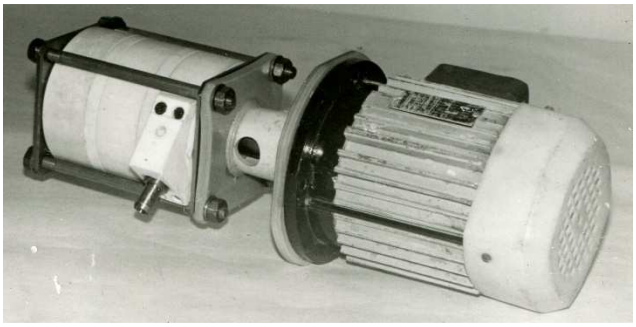


Рис. 2. Кислотостойкий трехступенчатый погружной насос



Рис. 3. Привод установки СГОМ - 1

Установка комплектуется источником униполярного импульсного тока, который позволяет применять различные режимы электролиза. Исследование возможности повышения равномерности электроосаждения за счет использования импульсного тока показало, что разнотолщинность осадков уменьшается в 1.5…2 раза при электроосаждении униполярным импульсным током частотой 25…30 кГц, скважностью 2…4 по сравнению с электроосаждением на постоянном токе. Использование импульсного тока в сочетании с интенсивной подачей электролита на движущуюся модель позволило вести электроосаждение при плотности тока 0,1…0,15 А/см^2 без ухудшения качества осадка.

Небольшие габариты установки позволяют размещать ее в стандартном вытяжном шкафу. Блоки источника питания, системы управления и контрольно-измерительные приборы вынесены из вытяжного шкафа.

Замена всех титановых корпусных элементов ванны и рабочей камеры на винипласт резко снижает себестоимость установки. Модульный принцип компоновки позволяет быстро перенастраивать ее для получения гальванокопий с различных поверхностей, что дает возможность получать практически все виды формующих элементов пресс-форм.

Список литературы

1. Кудрявцева О.В. Техническая гальванопластика. СПб.: Политехника, 2010. 147с.

2. Садаков Г.А. Гальванопластика. М.: Машиностроение, 1987, 288с.

3. Сундуков В.К., Гладун А.А., Булычев В.А. Установка скоростного гальванического осаждения металлов и сплавов // Сб. науч. тр. «Электрохим. и электрофиз методы обраб. материалов» / Тула: Изд - ТулГУ, 1995. С.24 – 33.

Гладун Андрей Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, agtcp@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

INSTALLATION OF HIGH-SPEED GALVANIC DEPOSITION OF METALS

A.A. Gladun

The conditions for obtaining galvanic precipitation with a high deposition rate are analyzed. The design of the SGOM-1 electroplating installation is considered. Schemes for applying electroplating coatings on surfaces of various shapes are given. The conditions for deposition of Ni - Co alloys on complex surfaces with high speed are determined.

Key words: high-speed galvanic deposition, galvanoplastics, the mold, electrolyzer.

Andrey Anatolyevich Gladun, candidate of technical sciences, docent, agtcp@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 62-83; 075.8

РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЯКОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В.С. Иванов, О.М. Федоров

Рассматривается система управления частотно-регулируемым электроприводом якорно-швартовного механизма, использующая математическую модель нагрузки. Приводится алгоритм расчета нагрузочных характеристик якорного механизма по стадиям съемки судна с якоря.

Ключевые слова: судовой, якорный механизм, частотно-регулируемый электропривод, механические нагрузочные характеристики.

Частотно-регулируемый электропривод (ЧРЭП) находит все большее применение на морских судах. Это определяется рядом его достоинств [1 - 3]:

программирование требуемых в соответствии с условиями эксплуатации статических и динамических характеристик исполнительного электродвигателя;

возможность стоянки под током с повышенным пусковым моментом;

ограничение пускового тока;

высокая экономичность при частичных нагрузках;

возможность дистанционного беспроводного управления;

диагностирование во время работы и защита.

Все эти достоинства наиболее полно проявляются в судовом регулируемом электроприводе, работающем в повторно-кратковременном или кратковременном нагрузочном режиме с переменной нагрузкой.

В настоящее время потенциальные возможности ЧРЭП якорно-швартовных механизмов (ЯШМ) используются не полностью. Микропроцессорная система управления электропривода позволяет достаточно точно согласовывать механические характеристики исполнительного электродвигателя с нагрузочными характеристиками рабочего механизма. Но для реализации такого управления необходимо точно знать или прогнозировать механические характеристики механизма.

Математическая модель нагрузочных режимов якорного механизма (ЯМ) позволит решить данную задачу. Предлагается перед началом работы ЯМ в режиме снятия судна с якоря, учитывая реальные условия работы

(глубину якорной стоянки, длину якорной цепи на клюзе, значение скорости ветра и течения) определять расчетным путем ожидаемые нагрузочные характеристики, с учетом которых затем будут формироваться автохарактеристика ЧРЭП ЯМ.

Структурная схема системы по расчету нагрузочных характеристик ЯМ приведена на рис. 1.

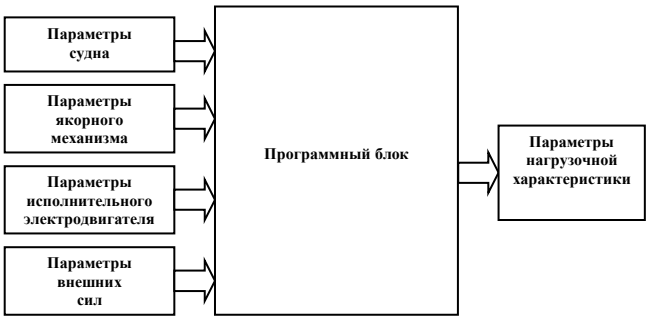


Рис. 1. Структурная схема системы по расчету нагрузочных характеристик ЯМ

Исходные параметры записываются в соответствующих блоках ввода данных.

Параметры судна: L, B, T – главные размерения судна (длина, ширина, осадка, Δ – объемное водоизмещение, S_1 - площадь надводной части корпуса судна в плоскости миделя, S_2 - суммарная площадь надстройки в плоскости миделя, $k_{воз}$– коэффициент ветрового давления, ε – редукционный коэффициент.

Параметры якорного механизма: $G_я$ – вес якоря, $L_к$ – длина якорной цепи на клюзе, $R_{зв}$ радиус цепной звездочки, p – вес погонного метра якорной цепи, h – глубина якорной стоянки, $f_к$ – коэффициент трения якорной цепи о клюз, $\eta_{пер}$ – КПД передачи.

Параметры исполнительного электродвигателя: $P_н$ – номинальная мощность, $n_н$ – номинальная частота вращения, $\gamma_{м.м}$ - кратность максимального момента.

Параметры внешних сил: $v_{воз}$ – скорость ветра, $v_{теч}$– скорость течения.

Внешними силами, действующими на судно и определяющими натяжение якорной цепи, являются:

$W_{воз}$ – сила действия воздуха (ветра);

$W_{вод}$ + $W_в$ – силы действия воды на корпус и на винт, создаваемые течением, а при съемки с якоря – также и скоростью подтягивания.

Внешняя сила, действующая на судно, равна:

$$W_с = W_{воз} + W_{вод} + W_в, \text{ Н}.$$

Обычно рассматривается случай совпадающего действия составляющих сил. Режим работы якорного электропривода характерно изменяется в процессе съемки судна с якоря. Можно выделить пять стадий [4].

В этом случае процесс будет протекать следующим образом (рис. 2).

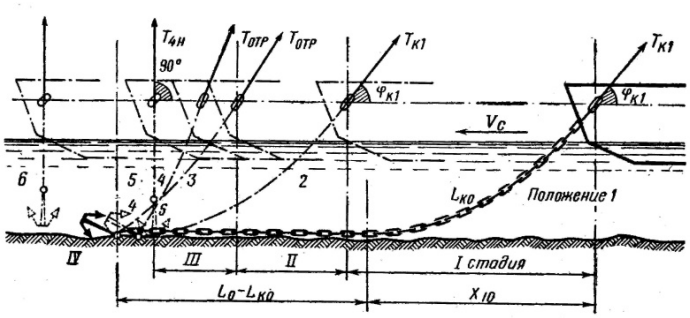


Рис. 2. Стадии съемки судна с якоря

I стадия связана с начальным подтягиванием судна в направлении места заложения якоря и постепенным поднятием цепи, лежащей на грунте.

Стадия характеризуется: $T_к$ = const – сила натяжения в якорной цепи у клюза; $\varphi_к$ = const – угол приложения силы натяжения цепи у клюза; $v_с$ = const – скорость подтягивания судна.

Переходный процесс пуска и разгона электропривода из-за его сравнительной быстротечности (3…4 с) можно не учитывать.

II стадия начинается после поднятия последнего звена цепи, лежащей на грунте.

Стадия характеризуется: ↑ $T_к$ = var; ↑ $\varphi_к$ = var; $v_с$ = const.

III стадия является сравнительно непродолжительной, но наиболее напряженной. Начинается она, когда тяговая сила в якорной цепи достигает отрывного значения.

Стадия характеризуется: $T_к = T_{отр}$ = const; n = const; ↑$\varphi_к$ = var; ↓$v_с$ = var.

IV стадия начинается с положения «якорь встал», когда судно выходит на панер. На гарантированной глубине судну на IV стадии может быть дан ход главной машиной.

Стадия характеризуется: ↓$T_к$ = var; $\varphi_к = 90^o$; ↑n = var.

V стадия связана с втягиванием якоря в клюз при малой скорости. Стадия эта непродолжительна и, как правило, не рассматривается, учитывая также и облегченную работу электродвигателя.

Таким образом, для формирования автохарактеристики ИД необходимо определить нагрузочную характеристику II стадии съемки судна с якоря с выходом на создание отрывного момента $M_{отр}$.

Приведем алгоритм расчета с комментариями.

1. Определение внешней силы $W_с$

1.1. Сила ветрового сопротивления:

$$W_{воз} = k_{воз} S_п v_{воз}^2, \text{ Н},$$

где $k_{воз}$– коэффициент ветрового давления, $Нс^2/м^4$, равный 0,24…0,60 в зависимости от конфигурации надстройки и типа судна (танкер, сухогруз, пассажирское судно); $S_п$ – парусящая поверхность судна, $м^2$; $v_{воз}$ – скорость ветра, отвечающая нормальным условиям съемки с якоря, считается равной $v_{воз}$ = 4 … 12 м/с (3 … 6 баллов по шкале Бофорта).

1.2. Находится парусящая поверхность в плоскости миделя судна:

$$S_{\text{п}} = \varepsilon\, S_1 + S_2,\ \text{м}^2,$$

где S_1 - площадь надводной части корпуса судна в плоскости миделя, м^2; S_2 - суммарная площадь надстройки в плоскости миделя, м^2; ε – редукционный коэффициент, учитывающий меньшее влияние на сопротивление воздуха корпуса судна сравнительно с надстройками.

Меньшее влияние связано с меньшей скоростью воздуха у воды и с большей обтекаемостью корпуса из-за его сплошности. Зависит от типа судна и равен 0,26…0,31.

1.3. Сопротивление воды подтягиванию судна (или сила трения $R_{\text{тр}}$) [4]:

$$W_{\text{вод}} = R_{\text{тр}} = \left(k_{\text{к}}\zeta_f + \Delta\zeta_f\right)\cdot S_{\text{см}}\cdot\rho_{\text{вод}}\frac{v_{\text{вод}}^2}{2},\ \text{Н},$$

где $k_{\text{к}}$ – поправочный коэффициент на влияние кривизны корпуса; ζ_f – коэффициент трения о воду. Зависит от характера обтекания судна потоком воды и определяется числом Рейнольдса Re; $\Delta\zeta_f$ – надбавка к коэффициенту трения, учитывающая шероховатость корпуса судна ($\Delta\zeta_f = 0{,}7\cdot10^{-3}$ … $1{,}2\cdot10^{-3}$); $S_{\text{см}}$ – смоченная поверхность корпуса судна, м^2; $v_{\text{вод}}$ – скорость обтекания водой корпуса судна, м/с; $\rho_{\text{вод}}$ – плотность морской воды, 1025 кг/м^3.

1.4. Поправочный коэффициент учета кривизны корпуса ($k_{\text{к}}$) зависит от соотношения L/B и при L/B = 6 - 12 равен 1,04 - 1,01.

1.5. Число Рейнольдса:

$$R_{\text{e}} = \frac{L\cdot v_{\text{вод}}}{\nu_{\text{c}}},$$

где ν– кинематический коэффициент вязкости морской воды, равный $0{,}012\cdot10^{-4}$ м^2/с при температуре морской воды 15ºС.

1.6. Коэффициент трения о воду корпуса судна ζ_f определяется по таблице [4].

1.7. Смоченная поверхность корпуса судна:

$$S_{\text{см}} = \left[2T + 1{,}37(\delta - 0{,}274)B\right]L\ ,\ \text{м}^2,$$

где L, B, T – главные размерения судна: длина, ширина, осадка, м; δ – коэффициент общей полноты водоизмещения судна:

$$\delta = \Delta/(L\ B\ T).$$

1.8. Скорость воды относительно корпуса судна:

$$v_{\text{вод}} = v_{\text{теч}} + v_{\text{с}}\ \text{м/с},$$

где $v_{\text{теч}}$– скорость течения нормируемая, принимается равной 5 уз (1уз = 0,514 м/с); $v_{\text{с}}$– скорость подтягивания судна при съемке с якоря, принимается равной – 0,17 м/с.

1.9. Сопротивление винта подтягиванию судна учитывается как процентная надбавка к сопротивлению воды:

$$W_{\text{в}} = 0{,}25\ W_{\text{вод}},\ \text{Н}.$$

1.10. Общее сопротивление движению судна, она же – внешняя сила, действующая на судно при съемке судна с якоря:

$$W_с = W_{воз} + W_{вод} + W_в \text{ , Н.}$$

2.Скорость подтягивания судна к месту заложения якоря на I-й стадии. Скорость подтягивания судна к месту заложения якоря, когда происходит одновременное поднятие цепи, лежащей на грунте, равна скорости выбирания цепи якорным устройством, т. е. на I-стадии $v_{с1}$ полностью определяется частотой вращения n_1 электродвигателя привода. Имеет место замкнутая взаимозависимость, изображаемая следующей цепочкой (рис. 3).

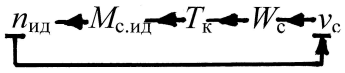


Рис. 3. Взаимосвязь между частотой вращения ИД и его нагрузкой

Эта неопределенность разрешается графическим путем. Для этого строятся нагрузочная характеристика $M_с=f(n)$ и механическая характеристика $M_{ид}=f(n)$ исполнительного двигателя. Точка пересечения характеристик К определит тот режим ИД, который установится в период I-стадии при подтягивании судна к месту заложения якоря.

2.1. Расчет механической характеристики асинхронного ИД выполняется по характерным точкам (в том случае, если она не приводится в формуляре на двигатель):

$M = 0$; $n_с$ – синхронная частота вращения;

$M_н$; $n_н$ - номинальный режим,

$$M_н = 9,55\frac{P_н}{n_н},$$

где $P_н$ – номинальная мощность ИД в ваттах; $M_{кр}$; $n_{кр}$ – критическая нагрузка (опрокидывающий момент вращения); $M_п$; $n_н = 0$ – пусковой режим (короткого замыкания).

Промежуточные точки рабочей части механической характеристики асинхронного двигателя определятся по приближенной формуле Клосса.

2.2. Расчет нагрузочной характеристики $M_с = f(n)$ выполняется в табличной форме (табл. 1).

Таблица 1

Расчет нагрузочной характеристики $M_с = f(n)$

n, об/мин	$v_с$, м/с	$v_{вод}$, м/с	$W_{вод}$, Н	$W_в$, Н	$W_{воз}$, Н	$W_с$, Н	$T_к$, Н	$M_с$, Нм
0	-	-	-	-	-	-	-	-
n_i	-	-	-	-	-	-	-	-

Задается ряд значений n (3÷4), включая номинальную $n_н$ и $n = 0$.

Скорость подтягивания судна на 1-й стадии:

$$v_{с1} = 2\pi R_{зв}\frac{n_1}{60i} \text{ , м/с.}$$

Затем уточняется значения внешней силы $W_с$, соответствующей $n_1(v_{с1})$.

2.3. Определение режимной точки (К) с M_1 и n_1 работы ЭП ЯШУ на I-й стадии приведено на рис. 4.

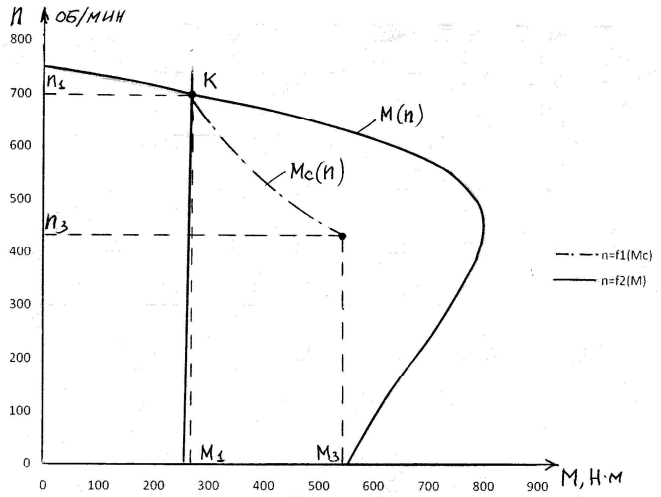


Рис. 4. Определение установившейся скорости якорного электропривода на I стадии

3. Построение характеристик состояния якорной цепи. Характеристики состояния якорной цепи представляют собой графики следующих функций [4]:

$$L_к = f_1\,(x_{кл}); \quad T_к = f_2\,(x_{кл}),$$

где $L_к$ – длина якорь-цепи на клюзе, м; $T_к$ – сила натяжения якорь-цепи у клюза, Н; $x_{кл}$ – отстояние судна от места заложения якоря (положение клюза), м.

Расчет состояния цепи на первой стадии.

Известными величинами являются: $p_1 = 0{,}87p$ – вес погонного метра якорной цепи с учетом потери веса в морской воде, Н/м; $W_с$ – внешняя сила, соответствующая скорости подтягивания судна $v_{с1}$, м/с; h – расчетная глубина стоянки, м; L_0 – полная (начальная) длина якорь цепи на клюзе, м.

Для расчетов используются уравнения свободно провисающей якорной цепи. Они выполняются в следующем порядке.

3.1. Расстояние от начала координат до касательной в точке наибольшего провисания якорь-цепи в соответствии с графиком цепной линии (характеризует весовые показатели цепи p_1 и растягивающие ее силы $W_с$):

$$a = \frac{W_с}{p_1}, \text{ м.}$$

3.2. Длина свободно провисающей якорь-цепи:

$$L_{к0} = \sqrt{\left(h^2 + 2ah\right)}\ , \text{ м.}$$

3.3. Длина проекции свободно провисающей якорь-цепи на грунт:

$$x_{10} = a \ln \frac{a + h + L_{ко}}{a}\ , \text{ м.}$$

3.4. Длина проекции полной начальной длины якорь цепи (полное начальное отстояние судна от места заложения якоря):

$$x_0 = L_0 - L_{к0} + x_{10}\text{ , м.}$$

3.5. Сила натяжения якорь-цепи у клюза:

$$T_{к1} = p_1(h + a) = p_1 h + W_с\text{ , Н.}$$

Все полученные величины являются на I стадии величинами неизменными. Построение характеристик состояния ведется по стадиям справа налево.

3.6. Расчет состояния цепи при натяжении.

В период I стадии, когда цепь свободно провисающая, нижний конец цепи касается грунта ($\varphi_г = 0$). Конец I стадии соответствует положению 1 якорной цепи (рис. 2). Начало ее натяжения на II стадии приводит к появлению угла скрещивания направления нижнего конца цепи с горизонталью ($\varphi_г > 0$) (рис. 5). Обычные уравнения цепной линии становятся неприемлемыми. В любой момент поднятая, но провисающая якорь-цепь может рассматриваться как часть некоторой свободно провисающей гибкой нити, расположенной в смещенной системе координат, относительно которой основные уравнения цепной линии остаются справедливыми.

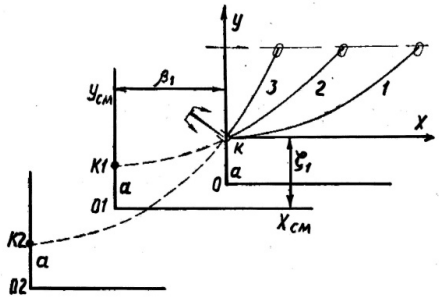


Рис. 5. Смещение осей координат при натяжении якорь-цепи

Сдвиг координатных осей определяется параметром β [4]. Он характеризует семейство цепных линий, проходящих через основное начало координат – держащую точку якоря. Для расчетов состояния якорной цепи на II и III стадиях используется обобщенное уравнение провисания якорной цепи:

$$h + \operatorname{ch}\frac{\beta}{a} = \operatorname{ch}\frac{x_{кл} + \beta}{a}.$$

Последовательность расчета $L_к$, $T_к$ и соответствующие формулы приведены в табл. 2.

3.7. Задаются рядом значений $x_{кл}$ ($x_{10} \div 0$). Находится параметр смещения координатных осей β. Он определяется аналитическим способом:

$$\beta = \frac{\operatorname{Arsh}\left(\dfrac{h}{2a \cdot \operatorname{sh}\left(x_{кл}/2a\right)}\right) 2a - x_{кл}}{2}\text{ , м.}$$

3.8. Достижение значения отрывной силы у клюза ($T_{к.отр}$) определяет момент начала III стадии съемки судна с якоря. Значение отрывной силы зависит от держащей силы якоря (для якоря Холла: $T_{г.о} = 3G_я$, Н). Когда

тяговая сила в якорной цепи достигает отрывного значения, происходит подрыв заиленного якоря и его волочение по грунту в сторону судна (рис. 6).

Таблица 2

Расчет характеристик состояния якорной цепи

$x_{кл}$, м	$x_{кл\ n}$	$x_{кл\ \ldots}$	$x_{кл\ 1}$
β	-	-	-
$\mathrm{tg}\varphi_г = \mathrm{sh}\dfrac{\beta}{a}$	-	-	-
$\mathrm{tg}\varphi_к = \mathrm{sh}\dfrac{x_{кл}+\beta}{a}$	-	-	-
$L_к = a\left(\mathrm{tg}\varphi_к - \mathrm{tg}\varphi_г\right)$	-	-	-
$T_к = p_1\left(h + a\,\mathrm{ch}\dfrac{\beta}{a}\right)$	-	-	-

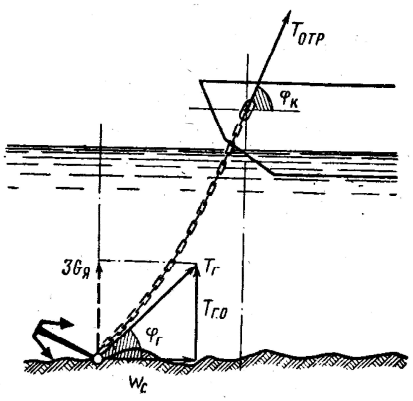


Рис. 6. Состояние цепи при подрыве якоря

3.9. Для определения отрывной силы используются следующие выражения:

$$\mathrm{tg}\varphi_{г0} = \frac{3G_я}{W_с} = \mathrm{sh}\frac{\beta_{отр}}{a};\quad \frac{\beta_{отр}}{a} = \mathrm{Arsh}\frac{T_{г0}}{W_с};T_{к.отр} = p_1(h + \mathrm{ch}\frac{\beta_{отр}}{a}).$$

Характеристики состояния якорной цепи в процессе подтягивания судна приведены на рис. 7.

4.Построение рабочей диаграммы якорного электропривода

Рабочая диаграмма включает следующие графические зависимости:

$$n = f_1(t),\ M = f_2(t),\ P = f_3(t).$$

Для построения рабочей диаграммы необходимо располагать механической характеристикой ИД и характеристиками состояния якорной цепи.

4.1. По режимной точке «К» на I-й стадии $(M_1;\ n_1)$ определяется полезная мощность на валу ИД:

$$P_1 = \frac{M_1 \cdot n_1}{9550}\ \text{, кВт.}$$

4.2. Продолжительность I-й стадии:

$$t_1 = \frac{x_1}{v_{c1}60} \text{ , мин.}$$

4.3. Длина якорной цепи, лежащей на грунте (путь, проходимый судном в период I стадии):

$$x_1 = x_0 - x_{10} \text{ , м.}$$

4.4. Продолжительность II-й стадии при $v_{c1} = v_{c2}$:

$$t_{2p} = \frac{x_{2p}}{v_{c1}60} \text{ , мин,}$$

где x_{2p}– расчетная длина II участка пути, м. Учитывая нелинейный характер изменения $L_к = f(x_{кл})$ и $T_к = (x_{кл})$ на II-й стадии, x_{2p} разбивается на несколько равных участков Δx_{2i} (3 … 5).

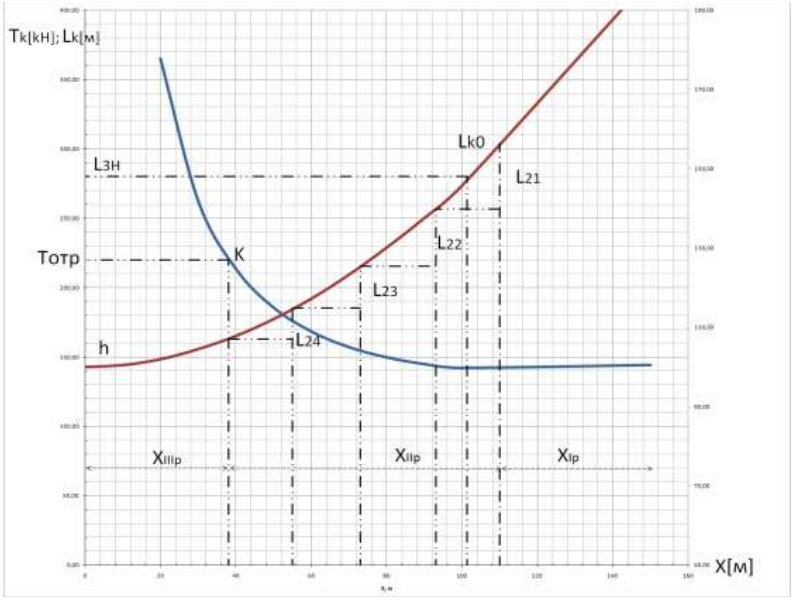


Рис. 7. Характеристики состояния якорной цепи в процессе подтягивания судна

На рабочей диаграмме продолжительность t_{2p} II-й стадии также делится на равные промежутки (3÷5) Δt в соответствии со вспомогательной характеристикой.

4.5. По кривой $L = f(x_{кл})$ устанавливается последовательно для каждого участка Δx_{2i} длина отрезка выбираемой якорь-цепи ΔL_{2i}.

4.6. На рабочей диаграмме для каждого промежутка времени Δt определяется частота вращения ЭП:

$$n_{2i} = \frac{\Delta L_{2i} i}{2\pi R_{зв} \Delta t} \text{ , об/мин.}$$

Откладывая на рабочей диаграмме n_{2i}, получаем ступенчатую кривую изменения частоты вращения ИД. Эта кривая может быть заменена плавной кривой, проходящей по серединам промежутков.

4.7. Момент сопротивления на каждом промежутке Δx_{2i}:

$$M_{c2i} = \frac{f_к T_{2i} R_{зв}}{i\eta_{пер}}\ , \text{Нм},$$

где T_{2i} – сила натяжения, отсчитываемая для середины рассматриваемого промежутка пути Δx_{2i}.

4.8. По механической характеристике ИД по n_{2i} определяются соответствующие значения M_{2i} исполнительного электродвигателя. Расчет параметров II стадии сводится в табл. 3.

Таблица 3

Расчет параметров рабочей диаграммы на II- стадии

ΔL_{2i}	м
n_{2i}	об/мин
M_{2i}	Нм
$T_{к2i}$	Н
M_{c2i}	Нм
P_{2i}	кВт

4.9. Мощность ИД по участкам II-й стадии:

$$P_{2i} = \frac{M_{2i} \cdot n_{2i}}{9550}\ , \text{кВт}.$$

На рис. 8 приведена рабочая диаграмма якорного электропривода для I-стадии и II-стадии расчетной.

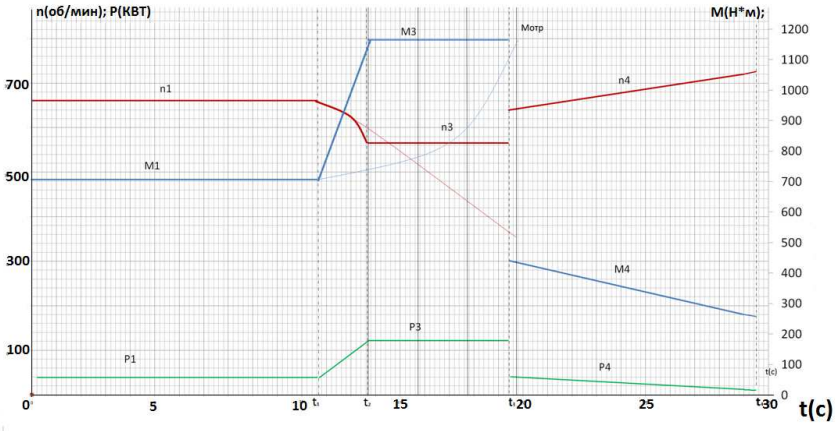


Рис. 8. Рабочая диаграмма якорного электропривода для I-стадии и II-стадии расчетной и скорректированной

4.10. Отрывное значение момента ЭП:

$$M_{отр} = \frac{f_к T_{отр} R_{зв}}{i\eta_{пер}}, \text{Нм}.$$

4.11. Более жесткая, чем требуется, механическая характеристика ЭД приводит к наличию значительных избыточных (динамических) моментов вращения, создающих повышенное натяжение якорной цепи, и, таким образом, преждевременный отрыв и волочение якоря. Это приводит к перегрузке ЭД.

На участке рабочей диаграммы, соответствующем расчетной II-стадии, строится зависимость $M_{2i}=f(n_{2i})$ и определяется реальный момент достижения $M_{\text{отр}}$. Продолжительность II-й стадии после коррекции составит t_2, мин.

4.12. Участок якорь-цепи, выбираемой за время t_2:

$$x_2 = x_{2\text{р}} \frac{t_2}{t_{2\text{р}}}, \text{ м.}$$

4.13. Скорость выбирания якорь-цепи на III-й стадии (при волочении якоря):

$$v_3 = 2\pi R_{\text{зв}} \frac{n_3}{i}, \text{ м/мин,}$$

где n_3 – определяется по механической характеристике ЭП по значению $M_{\text{отр}}$.

4.14. Длина якорной цепи на клюзе в начале III – стадии $L_{3\text{н}}$ определяется по характеристике состояния якорь-цепи с учетом реальной продолжительности II-стадии (для $x_{\text{кл}} = x_{10} - x_2$).

4.15. Продолжительность III-й стадии при волочении якоря:

$$t_3 = \frac{L_{3\text{н}} - h}{v_3}, \text{ мин.}$$

4.16. Мощность ИД на III-й стадии работы ЯШУ:

$$P_3 = \frac{M_{\text{отр}} \cdot n_3}{9550}, \text{ кВт.}$$

На рис. 4 вместе с механической характеристикой исполнительного асинхронного электродвигателя, соответствующей рабочей скорости, приведена нагрузочная характеристика ЯУ, соответствующая II стадии съемки судна с якоря.

Выводы:

1. В настоящее время ЧРЭП ЯШМ не использует возможности микропроцессорной системы управления в части согласования механических характеристик ИД и ЯМ.

2. Приведенный алгоритм расчета нагрузочной характеристики ЯМ для наиболее напряженной стадии съемки судна с якоря может быть запрограммирован в логическом контроллере в составе ЧРЭП ЯМ.

3. Автоматическая коррекция механической характеристики якорного ИД позволит уменьшить динамические нагрузки в электропривода и механические напряжения в цепи и редукторе, а, следовательно, повысить надежность работы ЯШМ.

Список литературы

1. Попов Е.В., Федоров О.М. Особенности и развитие электропривода якорно-швартовных механизмов // Приводы и компоненты машин. 2016. № 4-5. С. 19-22.

2. Иванов В.С., Саловский Л.О., Шняк Б.В. Анализ систем автоматического управления судовым асинхронным электроприводом // Эксплуатация морского транспорта. 2007. № 1(47). С. 42-50.

3. Иванов В.С., Соловей В.С. Судовой частотно-регулируемый многодвигательный привод // Сборник статей научно-практической конференции. СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015. Т. 2. С. 67-71.

4. Иванов В.С. Проектирование электроприводов якорно-швартовных устройств: метод. указания. СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2018. 44 с.

Иванов Владимир Сергеевич, канд. техн. наук, профессор, oleq_20@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова,

Федоров Олег Михайлович, аспирант, oleq_20@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

CALCULATION METHOD FOR DETERMINING THE LOAD CHARACTERISTICS OF AN ANCHOR ELECTRIC DRIVE

V.S. Ivanov, O.M. Fedorov

A control system for a frequency-controlled electric drive of an anchor-mooring mechanism using a mathematical model of the load is considered. The algorithm for calculating the load characteristics of the anchor mechanism for the stages of shooting the ship from the anchor is given.

Key words: ship, anchor mechanism, frequency-controlled electric drive, mechanical load characteristics.

Ivanov Vladimir Sergeevich, candidate of technical sciences, professor, oleq_20@mail.ru, Russia, St. Petersburg, State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarova,

Fedorov Oleg Mikhailovich, postgraduate, oleq_20@mail.ru, Russia, St. Petersburg, State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarova

УДК 62-523.2

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ С РАЗОМКНУТОЙ ОБМОТКОЙ СТАТОРА И БУФЕРНЫМ КОНДЕНСАТОРОМ

А.С. Лутонин, Я.Э. Шклярский

В статье рассматривается структура системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в режиме ослабленного поля. Система состоит из синхронного двигателя с разомкнутой обмоткой статора, подключенного к преобразователю частоты с источником постоянного напряжения с одной стороны и к вспомогательному преобразователю частоты с буферным конденсатором с другой стороны. Предложена структура системы управления, разработана имитационная модель в программном пакете MATLAB/Simulink. Получено, что предложенная система управления позволяет увеличить скоростной диапазон электромотора в 2.8 раз

Ключевые слова: синхронный, двигатель, постоянные магниты, СДПМ, разомкнутая обмотка статора, ослабленное поле, двойной преобразователь частоты.

Синхронные двигатели с постоянными магнитами широко распространены в промышленности, так как, в сравнении с остальными типами электродвигателей, они имеют наилучшие массогабаритные показатели [1]. Недостатками такого типа двигателей является сильное падение электромагнитного момента в режимах ослабленного поля и, как следствие, невозможность работы на скоростях выше номинальных. В работах [2-4] были представлены алгоритмы управления СДПМ в режимах ослабленного поля. В исследованиях [5] были проведены сравнительные измерения скорости СДПМ в зависимости от типа подключения концов обмоток статора. Графики отображают увеличение скорости в случае использования СДПМ с подключением второго преобразователя частоты к концам обмоток статора. В [6] была предложена система управления СДПМ РО с пятиплечевым преобразователем частоты. В работе [7] представлено сравнение различных топологий с использованием СДПМ с разомкнутой обмоткой статора. В публикации [8] представлена система управления СДПМ с разомкнутой обмоткой статора с двумя преобразователями частоты и двумя независимыми источниками напряжения. Работа [9] описывает алгоритм управления СДПМ с разомкнутой обмоткой статора совместно с использованием электролитического конденсатора в составе вспомогательного преобразователя частоты (ВПЧ) и гибридной ШИМ модуляцией. Результаты показали увеличение скорости СДПМ в 2 раза в сравнении с номинальной величиной.

Данная работа представляет систему управления СДПМ с разомкнутой обмоткой статора совместно с источником постоянного напряжения в составе главного преобразователя частоты и конденсаторной батареи в составе вспомогательного преобразователя частоты с системой контроля уровня заряда конденсатора, а также системой регулирования активной и реактивной мощности каждого преобразователя частоты.

Система синхронного двигателя с постоянными магнитами с разомкнутой обмоткой статора. В схемах управления электродвигателем с разомкнутой обмоткой каждая из обмоток статора разомкнута и подключена к одному из двух преобразователей частоты. Один из преобразователей частоты рассматривается как первичный источник энергии и подключён к источнику постоянного напряжения. Вспомогательный преобразователь подключён к буферному конденсатору. Общая схема подключения представлена на рис. 1.

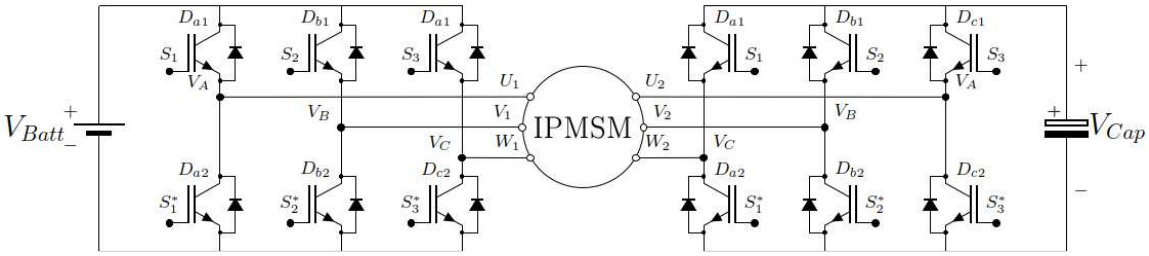


Рис. 1. Топология СДПМ с буферным конденсатором

Так как каждая из обмоток статора СДПМ подключена к двум источникам напряжения, то результирующим значением напряжения для электродвигателя будет разница между потенциалами этих источников (рис. 2).

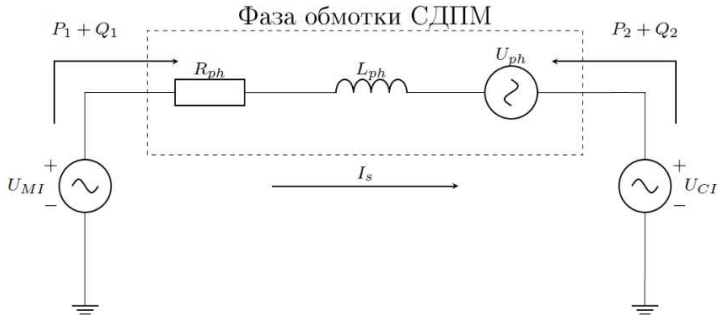


Рис. 2. Схема замещения СДПМ РО

В соответствии с рис. 2, можно записать следующие уравнения:

$$\vec{U}_{MI} = \vec{U}_m + \vec{U}_{CI}, \quad (1)$$

$$U_{MI\,d} - U_{m\,d} - U_{CI\,d} = 0, \quad (2)$$

$$U_{MI\,q} - U_{m\,q} - u_{CI\,q} = 0, \quad (3)$$

где U_{MI} – напряжение тяговой батареи; U_{CI} – напряжение буферного конденсатора; U_m– напряжение на концах обмотки электродвигателя.

Уравнения для СДПМ относительно вращающейся системы координат d-q, в соответствии с [8, 9] могут быть представлены как:

$$U_{m\,d}(t) = U_{MI\,d}(t) - U_{CI\,d}(t) = R \cdot I_d(t) + L_d \frac{dI_d(t)}{dt} - \omega_{me}(t) \cdot L_q \cdot I_q(t), \quad (4)$$

$$U_{m\,q}(t) = U_{MI\,q}(t) - U_{CI\,q}(t) = R \cdot I_q(t) + L_q \frac{dI_q(t)}{dt} - \omega_{me}(t) \cdot L_d \cdot I_d(t) + \omega_{me}(t) \cdot \psi_{pm}, \quad (5)$$

$$T_e(t)=\frac{3}{2}p\cdot\left(\psi_{pm}+\left(L_d-L_q\right)\cdot I_d(t)\right)\cdot I_q(t), \qquad (6)$$

где $U_{md}(t), U_{MI\,d}(t), U_{CI\,d}(t)$ – напряжения на концах обмотки электродвигателя, тяговой батареи и буферного конденсатора относительно оси d; $U_{mq}(t), U_{MI\,q}(t), U_{CI\,q}(t)$ – напряжения на концах обмотки электродвигателя, тяговой батареи и буферного конденсатора относительно оси q; R_s – сопротивление статора; L_d – индуктивность относительно оси d; L_q – индуктивность относительно оси q; $\omega_{me}(t)$ – скорость вращения электромагнитного поля ротора; ψ_{pm} – потокосцепление постоянных магнитов электродвигателя; $I_d(t)$ – ток СДПМ относительно оси d; $I_q(t)$ – ток СДПМ относительно оси q; $T_e(t)$ – электромагнитный момент СДПМ; p – число полюсов электродвигателя.

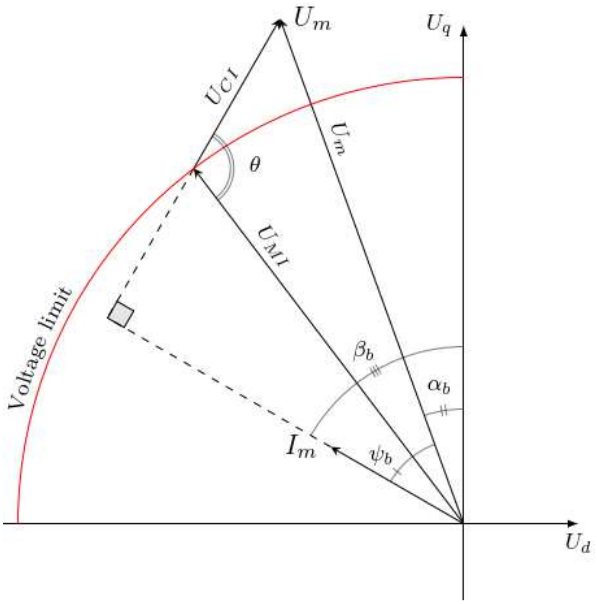


Рис. 3. Векторная диаграмма СДПМ РО

На рис. 3 представлена векторная диаграмма напряжений для топологии электропривода СДПМ с разомкнутой обмоткой статора и буферным конденсатором. В соответствии с рисунком, вектор тока электродвигателя I_m опережает его напряжение U_m на угол ψ_b. Согласно рисунку, вектор напряжения U_{MI} также опережает вектор тока I_m, что свидетельствует о том, что преобразователь частоты, с подключенной к нему тяговой батареей, является источником как активной, так и реактивной мощности в о время как напряжение U_{CI}, будучи перпендикулярным току I_m, способствует передачи только реактивной мощности от преобразователя частоты, с подключенным к нему буферным конденсатором. Таким образом, активная и реактивная мощность, подводимая к электродвигателю от каждого из преобразователей частоты, регулируется посредством изменения угла сдвига фаз напряжений U_{MI} и U_{CI} относительно вектора тока

статора. При этом, существует возможность регулирования амплитуд и углов каждого из вектора напряжений при сохранении вектора напряжения U_m в фиксированном положении.

Таким образом, увеличение угла θ_b способствует уменьшению амплитуды вектора напряжения U_{MI}. С другой стороны, также существует возможность увеличения результирующего вектора U_m если главный преобразователь использовать как активно-реактивный источник энергии с заданием максимально возможной амплитуды вектора U_{MI}

Таким образом, амплитуда векторов U_{CI}, U_{MI} могут быть найдены в соответствии с уравнениями:

$$U_{MI}^{d} = U_m \cos(\psi_b)\cos(\beta_b) - U_m\left(\sin(\psi_b) - U_{react}\right)\sin(\beta_b), \quad (7)$$

$$U_{MI}^{q} = U_m \sin(\psi_b)\cos(\beta_b) + U_m\left(\sin(\psi_b) - U_{react}\right)\cos(\beta_b), \quad (8)$$

$$U_{CI}^{d} = U_{cap}^{set}\cos(\beta_b) + U_{react}\sin(\psi_b), \quad (9)$$

$$U_{CI}^{q} = U_{cap}^{set}\sin(\beta_b) - U_{react}\cos(\psi_b), \quad (10)$$

где U_{MI}^{d}, U_{MI}^{q} – управляющее задание напряжений для преобразователя частоты с подключенной тяговой батареей; U_m – результирующий вектор напряжения; U_{CI}^{d}, U_{CI}^{q} – управляющее задание напряжений для преобразователя частоты с буферным конденсатором; U_{cap} – уровень напряжения буферного конденсатора; U_{cap}^{set} – заданное значение уровня напряжения конденсатора, которое формируется как отношение выходного сигнала ПИ регулятора, входом которого является разница заданного и текущего уровня напряжения.

Амплитуда реактивной составляющей управляющего вектора напряжения U_{react}, которую может компенсировать вспомогательный преобразователь частоты, находится в соответствии с уравнениями (11) – (12):

$$U_{react} = k_d U_m \sin(\psi_b) \text{ если } U_m \sin(\psi_b) < U_{cap}/\sqrt{3}, \quad (11)$$

$$U_{react} = k_d U_{cap}/\sqrt{3} \text{ если } U_m \sin(\psi_b) \geq U_{cap}/\sqrt{3}, \quad (12)$$

где k_d - коэффициент, фиксирующий положение вектора U_m относительно вектора тока I_m который равен "1" при значениях угла $\psi_b \geq 0$ и "–1" при значениях угла $\psi_b < 0$.

Имитационное моделирование. Имитационное моделирование проводилось при помощи программного пакета MATLAB/Simulink. Общий вид модели представлен на рис. 4**.**

Система состоит из следующих блоков: Модель мотора СДПМ с разомкнутой обмоткой статора «OW PMSM», модель преобразователей частоты с подключенными к ним аккумуляторной батареей и буферным кон-

денсатором, блок алгоритма управления «Control», а также блок формирования задания по скорости «Input2». Более подробно блок «Control» представлен на рис. 5.

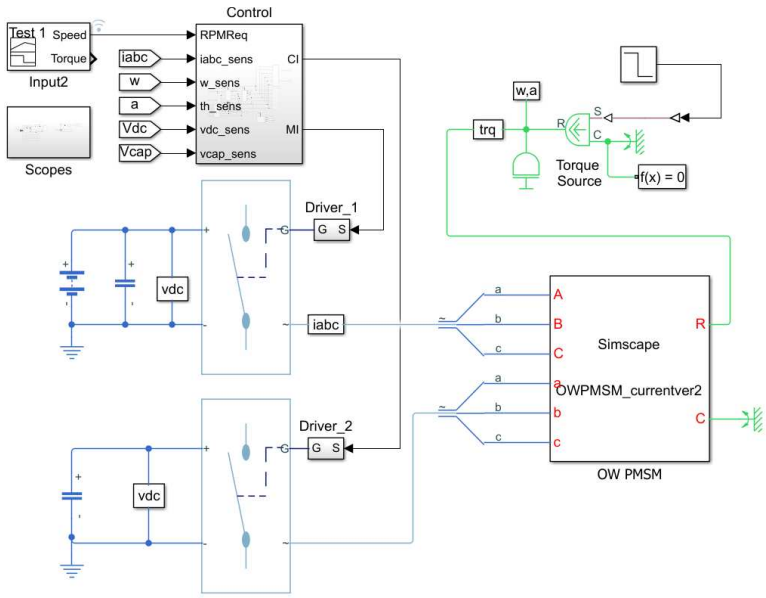


Рис. 4. Общий вид модели СДПМ РО в программном пакете MATLAB/Simulink

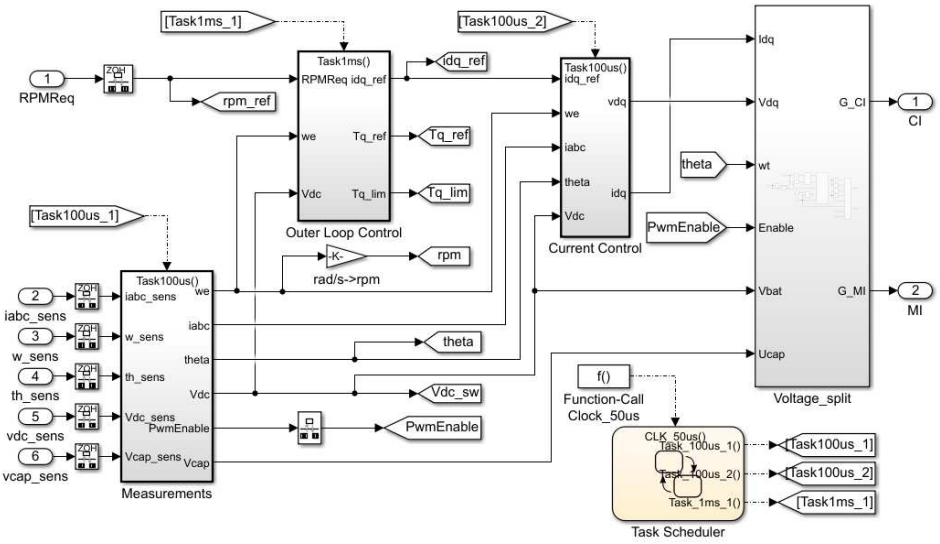


Рис. 5. Общий вид блока «Control»

Работа блока «Control» проходит по следующему алгоритму: Сигнал задания скорости «RPMReq» вместе с текущим значением скорости «we» и значением текущего уровня напряжения звена постоянного тока «Vdc» поступает на блок «Outer loop control», который состоит из ПИ регулятора скорости и блока формирования токов i_q, i_d. Далее управляющие значения тока, совместно с текущим значением скорости «we», значениями токов статора «iabc», угла поворота ротора «we», а также значения напряжения звена постоянного тока «Vdc», поступают в блок формирования значений напряжения «Current control», который состоит из

двух ПИ регуляторов для каждого из значений токов по осям d и q, а также блока ограничения выходного напряжения. Сформированное значение управляющего напряжения поступает в блок «Voltage split», который подробно представлен на рис. 6.

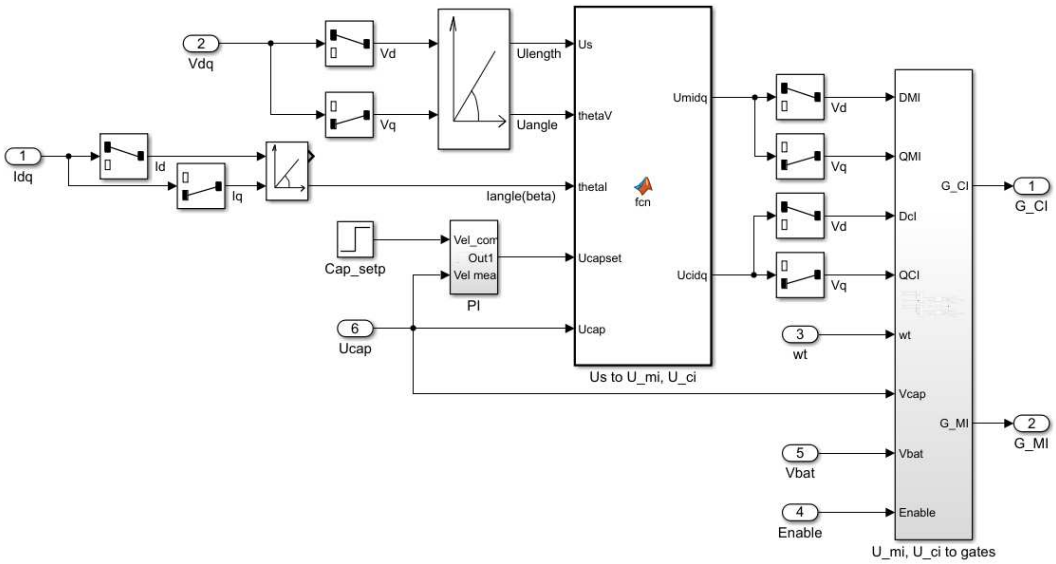


Рис. 6. Общий вид блока «Voltage split»

В подсистеме «Voltage split» основными блоками являются «Us to U_mi, U_ci» и «Us to U_mi, U_ci». Первый блок формирует значения управляющих векторов напряжения для двух преобразователей частоты на основе уравнений (7 – 12). Второй, на основе заданных векторов напряжений, генерирует импульсы в соответствии с законами векторной широтно-импульсной модуляции.

Параметры мотора, используемые для симуляции, представлены в таблице.

Основные параметры СДПМ

Тип электромотора	СДПМ
Номинальное напряжение	370В
Номинальный ток	108А
Номинальная скорость	2500 об/мин
Число пар полюсов	10
Индуктивность по оси q	1.2 мГн
Индуктивность по оси d	1 мГн
Потокосцепление	0.0973 Вб
Сопротивление обмотки	0.016 Ом
Момент инерции	0.1234 кг·м^2

Моделирование проводилось со следующими параметрами: Система с СДПМ и векторным управлением получала питание от источника постоянного напряжения номиналом 370В.

Значение задания напряжения для буферного конденсатора составляло 210В. В момент времени 0.1с производился наброс нагрузки на вал ротора номиналом 45 Нм. Результаты реакции модели на задание по скорости представлены на рис. 7, 8.

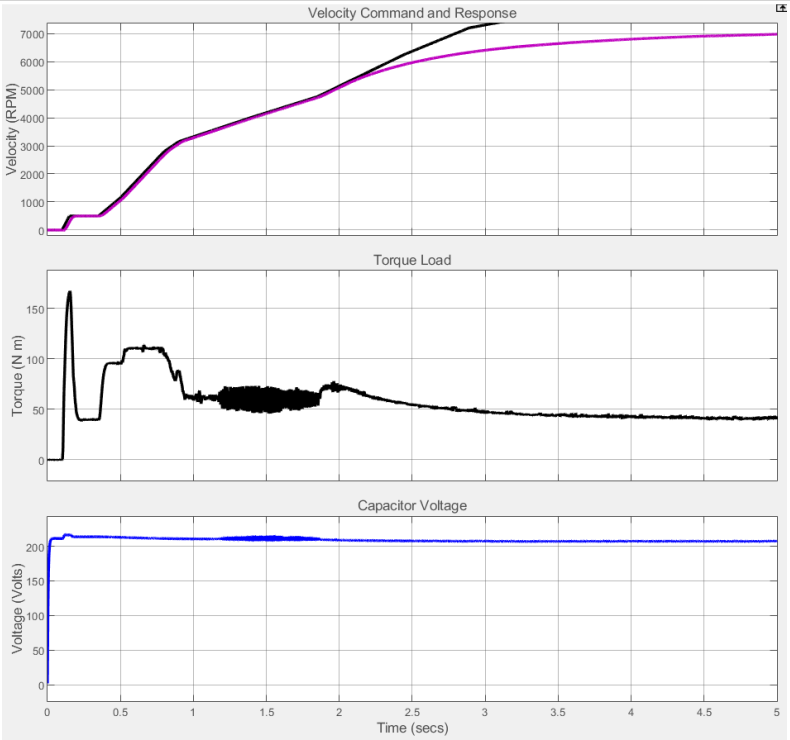


Рис. 7. Результаты моделирования

Заключение. Работа системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами с разомкнутой обмоткой статора имеет следующую последовательность: после заряда конденсаторной батареи, преобразователь частоты с подключённой аккумуляторной батареей работает в режиме генерации только активной составляющей вектора напряжения в то время как преобразователь частоты с подключенной конденсаторной батареей генерирует формирует реактивную его часть.

Задание по скорости было намеренно завышено для определения максимально возможной скорости, которую может достичь мотор. Предложенная система управления достигла значения результирующей скорости в 7000 об/мин, что в 2.8 раза выше по сравнению с номинальными параметрами электромотора. Дальнейшее повышение скорости ограничено нагрузкой на валу ротора в 45 Нм которая является максимально достижимым значением для мотора на скорости в 7000 об/мин. В процессе модуляции значение уровня напряжения конденсатора остается равным установленному значению. Дальнейшие исследования предполагают рассмотрение реакции предложенной системы в составе тяговой установки электромобиля в режимах разгона, динамического торможения.

Список литературы

1. Finken T., Felden M., Hameyer K. 2008 Comparison and design of different electrical machine types regarding their applicability in hybrid electrical vehicles // Proceedings of the 2008 international conference on electrical machines. 2008. P. 1-5.

2. Tursini M., Chiricozzi E., Petrella R. Feedforward flux-weakening control of surface-mounted permanent-magnet synchronous motors accounting for resistive voltage drop // IEEE Trans. Ind. Electron. 2010. 57. P. 440-448.

3. Kwon T.S., Sul S.K. Novel antiwindup of a current regulator of a surface-mounted permanent-magnet motor for flux-weakening control // IEEE Trans. Ind. Appl. 2006. 42. P. 1293-1300.

4. Tripathi A., Khambadkone A.M., Panda S.K. Dynamic control of torque in overmodulation and in the field weakening region // IEEE Trans. Power Electron 2006. 21. P. 1091–1098.

5. Chu L. Research on Control Strategies of an Open-End Winding Permanent Magnet Synchronous Driving Motor (OW-PMSM)-Equipped Dual Inverter with a Switchable Winding Mode for Electric Vehicles // Energies. 2017. 10. 5 p.

6. Dai S., Wei J., Zhou B., Xue J. The Control Strategy of Open-Winding Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System Based on Five-Leg Inverter // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). 2016. P. 1-5.

7. Loncarski J., Leijon M., Srndovic M., Rossi C., Grandi G. Comparison of output current ripple in single and dual three-phase inverters for electric vehicle motor drives // Energies. 2015. 8. P. 3832–3848.

8. Casadei D., Grandi G., Lega A., Rossi C. Multilevel Operation and Input Power Balancing for a Dual Two-Level Inverter with Insulated DC Sources // In IEEE Transactions on Industry Applications. 2008. 44. P. 1815-1824.

9. Lee Y., Ha J. Hybrid Modulation of Dual Inverter for Open-End Permanent Magnet Synchronous Motor // In IEEE Transactions on Power Electronics. 2015. 30. P. 3286-3299.

Лутонин Александр Сегреевич, аспирант, lutonin93@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный университет,

Шклярский Ярослав Элиевич, д-р техн. наук, доцент, js-10@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный университет

PERMANENT MAGNET MOTOR CONTROL SYSTEM WITH OPEN-END WINDING AND FLOATING BRIDGE CAPACITOR

A.S. Lutonin, Ya.E. Shklyarskiy

Paper represents control system design for permanent magnet synchronous motor to work in field weakening mode. The topology consists of two inverters: Main bridge inverter which is powered by DC battery at one side of motor windings and Floating bridge inverter with a capacitor connected to the other side of motor windings. The structure of the control system is proposed, The simulation model is developed in MATLAB/Simulink software package. Obtained results shows that proposed control system helps to reach 2.8 times more maximum speed than a conventional one.

Key words: PMSM, permanent, magnet, synchronous, motor, Open-end winding, OEW, dual inverter drive, field weakening.

Lutonin Aleksandr Sergeevich, postgraduate, lutonin93@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University,

Shklyarskiy Yaroslav Elievich, doctor of technical sciences, docent, js-10@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University

УДК 621.355.29

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СВИНЦОВО-КИСЛОТНОГО АККУМУЛЯТОРА

А.А. Постников

Приводятся описание эксперимента и результаты измерений внутреннего сопротивления стартерных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей на переменном токе. Выполненные измерения позволили построить зависимости внутреннего сопротивления аккумуляторных батарей от степени заряженности и температуры электролита.

Ключевые слова: емкость, техническое состояние, степень заряженности, внутреннее сопротивление.

В настоящее время аккумуляторные батареи используются в различных отраслях промышленности, однако, независимо от области применения аккумуляторных батарей (АБ), своевременная информация об их техническом состоянии крайне важна для эксплуатирующего персонала. Наибольшей достоверностью обладает метод оценки технического состояния АБ по величине фактической емкости, но этому методу присущи такие недостатки, как большая длительность, высокие стоимость и трудоемкость. По мнению широкого круга исследователей, наиболее перспективен метод оценки технического состояния АБ по внутреннему сопротивлению [1]. Помимо оценки технического состояния АБ и её правильной эксплуатации в реальных условиях, внутреннее сопротивление применяется и в математическом или имитационном моделировании работы АБ [2]. Различают методы измерения $r_{\text{вн}}$, Ом, на переменном и постоянном токах. Методики измерения $r_{\text{вн}}$ подробно описаны в ГОСТ Р МЭК 60285-2002 [3], ГОСТ Р МЭК 61960-2007 [4].

Наиболее распространенными являются свинцово-кислотные АБ. Они применяются на транспорте, в системах бесперебойного электропитания телекоммуникационного оборудования, в качестве накопителей электроэнергии и др. Внутреннее сопротивление свинцово-кислотных батарей измеряется лишь на постоянном токе ГОСТ Р МЭК 60896-21-2013 [5], ГОСТ Р МЭК 60896-11-2015 [6]. Из ГОСТ Р 53165-2008 [7] следует, что измерение внутреннего сопротивления стартерных свинцово-кислотных АБ вовсе не предусмотрено. Тем не менее, исследователями продолжаются работы по совершенствованию методов измерения внутреннего сопротивления и оценки технического состояния свинцово-кислотных АБ, в том числе и при различных температурах окружающей среды [8].

В связи с этим, представляется важным на основе эксперимента выполнить проверку возможности оценки технического состояния стартерных свинцово-кислотных АБ по внутреннему сопротивлению. Таким образом, необходимо установить зависимость внутреннего сопротивления от количества электричества, которое АБ может отдать во внешнюю электрическую цепь при различных температурах электролита.

Описание экспериментальной установки. В качестве объекта исследования использовались стартерные свинцово-кислотные АБ типа 6СТ-190L(4) производства ООО «РАЗ Тангстоун» номинальным напряжением $U_{\text{ном}} = 12$ В и номинальной емкостью $C_{\text{ном}} = 190$ А·ч. До начала эксперимента исследуемые АБ в эксплуатации не были. Эксперимент проводился в аттестованной лаборатории. Основу экспериментальной установки составили:

тестер аккумуляторных батарей «BITRODE LCN 6-50-12»;
термопары (ТП) хромель-копелевые (ГОСТ Р 8.585-2001 ГСИ);
климатическая камера «CRIO-KING ULTRA LOW»;
набор ареометров АОН-1 (700 – 1840);
мультиметр «APPA 109N»;
измеритель-регулятор температуры «ОВЕН ТРМ-138»;
тестер аккумуляторных батарей «Midtronics Celltron Start CTS-500»;
USB осциллограф – генератор «PCSGU250»;
портативный электроизмерительный прибор «Анализатор ЭДА».

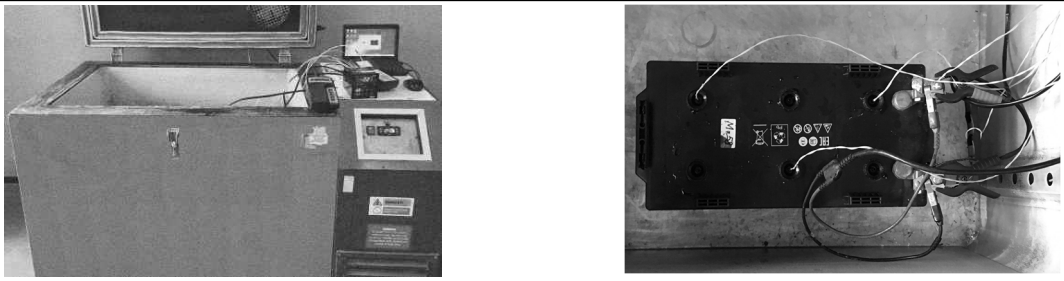
Регистрация измеряемых параметров АБ осуществлялась в ручном и автоматизированном режиме на электронно-вычислительной машине (ЭВМ) при помощи установленного программного обеспечения:

VisuaLCN Lab Client;
PC-LAB2000LT;
SCADA Owen Process Manager V.1.

Предварительно выполнен монтаж термопар (ТП) в кислотостойкой оболочке внутри корпуса АБ. Всего смонтировано пять ТП. Общий вид АБ, размещенной в климатической камере со смонтированными ТП, представлен на рис. 1.

Три ТП размещались в крайних и среднем аккумуляторах, одна ТП смонтирована на выводе батареи и еще одна находилась в подвешенном состоянии для контроля температуры внутри морозильной камеры. К выводам АБ подключены «Midtronics Celltron Start CTS-500» и портативный электроизмерительный прибор «Анализатор ЭДА».

Экспериментальная установка позволяла измерять емкость АБ C, А·ч; степень заряженности АБ $\Delta C_{\text{з}}$, %; напряжение разомкнутой цепи $U_{\text{нрц}}$, В; напряжение под нагрузкой $U_{\text{н}}$, В; ток разряда $I_{\text{р}}$, А; время заряда $I_{\text{з}}$, А; плотность электролита ρ, кг/м^3, температуру электролита $T_{\text{эл}}$, К, ($t_{\text{эл}}$, °С); температуру окружающей среды $T_{\text{окр}}$, К, ($t_{\text{окр}}$, °С); время разряда $\tau_{\text{р}}$, с; время заряда $\tau_{\text{з}}$, с; ток холодной прокрутки $I_{\text{хп}}$, А; внутреннее сопротивление $r_{\text{вн}}$, Ом.



а ***б***

Рис. 1. Общий климатической камеры: а – общий вид климатической камеры; б – общий вид батареи внутри климатической камеры

Методика измерений. Перед экспериментом выполнены замеры параметров АБ. Контрольный разряд батарей выполнен в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ Р 53165-2008 [7]. Частичный разряд АБ осуществлялся при помощи универсального тестера аккумуляторных батарей «BITRODE LCN 6-50-12» путем подсчета электричества, отданного во внешнюю электрическую цепь на постоянную нагрузку. Каждому разряду предшествовал полный заряд АБ. Измерения параметров, за исключением количества отданного электричества, выполнялись после релаксации батарей не менее 12 часов. Результаты измерений представлены в таблице.

Усредненные значения эксплуатационных параметров батарей

$\Delta C_з$, %	C, А·ч	ρ, $\times 10^3$, кг/м^3	$t_{эл}$, °С	$U_{нрц}$, В	$r_{вн}$, $\times 10^{-3}$, Ом
100	193	1,287	24,6	12,84	2,181
75	147	1,254	25,1	12,63	2,293
50	95	1,213	24,5	12,21	2,515
0	0	1,077	24,9	11,7	4,945

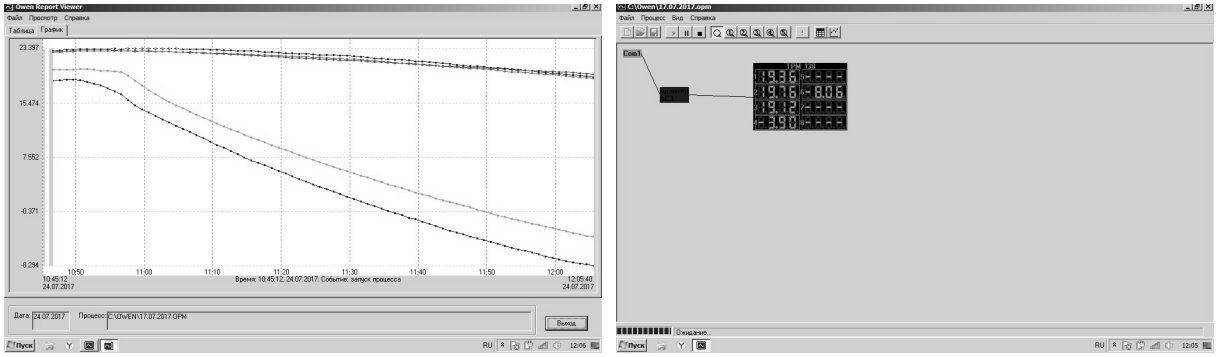
Контрольные замеры внутреннего сопротивления $r_{вн}$ выполнены «Анализатором ЭДА». Дополнительно изменения напряжения АБ $U_н$ при подаче тестового сигнала фиксировались USB осциллографом. Степень заряженности АБ $\Delta C_з$, ток холодной прокрутки $I_{хп}$ определялся при помощи «Midtronics Celltron Start CTS-500».

Затем АБ помещалась в морозильную камеру. Температура внутри нее устанавливалась $t_{окр} = -40$ °С. Изменения значений температур записывались в автоматизированном режиме с периодичностью одна минута (рис. 2).

В целях исключения возможных ошибок и взаимного влияния друг на друга, измерительные приборы подключались к АБ поочередно. Периодичность измерений 15 минут. Величина внутреннего сопротивления $r_{вн}$ вычислялась по формуле

$$r_{вн\,f} = \frac{\Delta U_{\sim}}{I_{\sim}},$$

где $r_{\text{вн}\,f}$ − внутреннее сопротивления АБ, измеренное на частоте сигнала *f*, Гц; $\Delta U_{\sim}$ − изменение напряжения АБ при воздействии тестового сигнала, В; $I_{\sim}$ − переменный ток, пропускаемый через АБ, А.

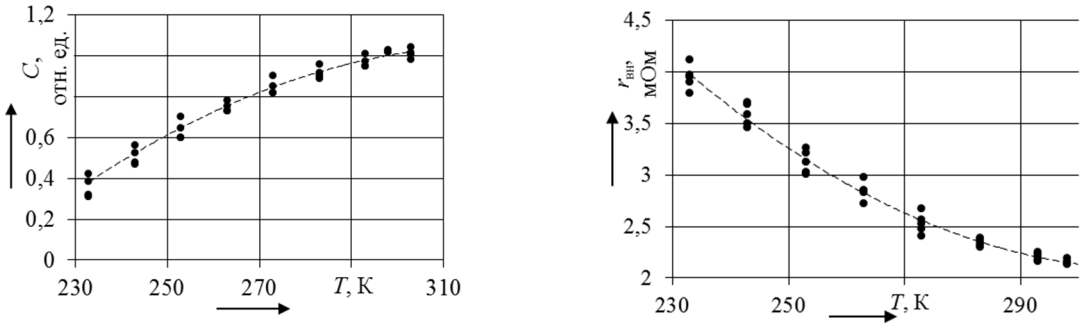


а ***б***

Рис. 2. Окно текущего процесса SCADA Owen Process Manager v.1: а – график изменения температур электролита, вывода АБ и климатической камеры; б – рабочее окно SCADA Owen ProcessManager v.1

Для расчета $r_{\text{вн}}$ бралось действующее значение переменного напряжения $\Delta U_{\sim}$. На генераторе устанавливалась частота переменного напряжения *f*=10 Гц с номиналом $U_{\sim}=100$ мВ. Затем генератор подключался к выводам АБ. Параллельно к выводам АБ подключался USB осциллограф.

Результаты измерений. Эксперимент позволил выявить качественные особенности изменения внутреннего сопротивления АБ с различными степенью заряженности и температурой электролита. Зависимости емкости и внутреннего сопротивления полностью заряженной АБ типа 6СТ-190 от температуры представлены на рис. 3.



а ***б***

Рис. 3. Зависимости емкости и внутреннего сопротивления полностью заряженной АБ типа 6СТ-190 от температуры: а – зависимость емкости полностью заряженной АБ от температуры электролита; б – зависимость внутреннего сопротивления полностью заряженной АБ от температуры электролита

Зависимость емкости АБ от температуры электролита (рис. 3, а) не линейна, и изменяется в диапазоне рабочих температур примерно от 1,03 при температуре электролита 25 °С (298 К) до 0,5 отн. ед. при температуре электролита минус 40 °С (233 К) или от 195 до 95 А·ч. Внутреннее сопротивление полностью заряженной батареи (рис. 3, б) изменяется в диапазоне от 2,143 мОм при температуре электролита 25 °С (298 К) до 4,1 мОм при температуре электролита минус 40 °С (233 К). Дальнейшее снижение температуры электролита и глубокие разряды АБ могли спровоцировать их выход из строя.

Известно, что емкость АБ коррелирует с таким параметром, как степень заряженности батареи. Это позволило построить зависимости внутреннего сопротивления от степени заряженности АБ при различных значениях температуры электролита (рис. 4).

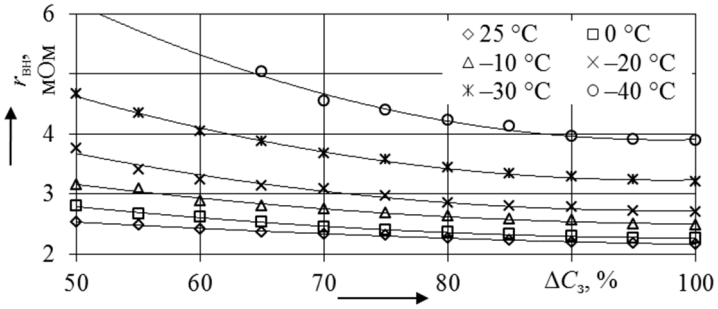


Рис. 4. Зависимость внутреннего сопротивления от степени заряженности батареи при различной температуре электролита

Представленные на рис. 4 зависимости внутреннего сопротивления от степени заряженности батареи при различной температуре электролита имеют практическую ценность и позволяют оценить техническое состояние АБ в различных условиях эксплуатации.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 3, а, б и 4, позволил установить целевую функцию – внутреннее сопротивление АБ. На рис. 5 приведена функция внутреннего сопротивления АБ от температуры электролита и емкости АБ при частоте воздействующего переменного тока 10 Гц. Экспериментальные данные обработаны в среде пакета прикладных программ «STATISTICA 10».

Функция отклика внутреннего сопротивления имеет вид

$$z = 0{,}0007x^2 + 5{,}556y^2 - 0{,}332x + 17{,}968y - 0{,}099xy + 43{,}827,$$

в натуральном масштабе

$$r_{вн} = 0{,}0007 \cdot T^2 + 5{,}556 \cdot C^2 - 0{,}332 \cdot T + 17{,}968 \cdot C - 0{,}099 \cdot T \cdot C + 43{,}827.$$

В области нижней границы частотного диапазона импеданс достигает сравнительно больших значений, что объясняется более сильным характером поляризации диффузии, которая увеличивается при уменьшении частоты воздействующего тока.

При пропускании через батарею переменного тока с номиналом близким к 1000 Гц отклонение напряжения на выводах батареи составляло около $\Delta U_{н\sim} \approx 1{,}5 \cdot 10^{-6}$ В, тогда как при частотах переменного тока около

10 Гц $\Delta U'_{\text{н}_\sim} \approx 2 \cdot 10^{-4}$ В и более. Отсюда следует, что изменение напряжения на выводах батареи в указанной области частот обладает большей чувствительностью, следовательно, с экономической точки зрения, предпочтительнее при измерениях.

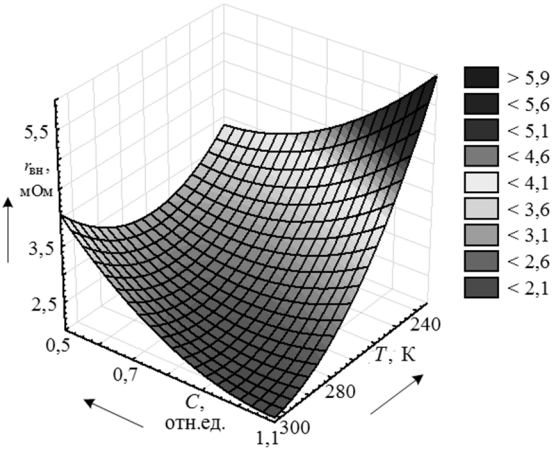


Рис. 5. Зависимость внутреннего сопротивления ($f = 10$ Гц) ***батареи 6СТ-190 от емкости и температуры электролита***

Несомненно, данные о связи внутреннего сопротивления $r_{\text{ВН}}$ и напряжения на выводах АБ $\Delta U_{\text{н}}$ могут быть достаточно информативны при контроле технического состояния АБ. Гораздо большую ценность представляют данные о связи внутреннего сопротивления $r_{\text{ВН}}$ с емкостью АБ C. В таком случае $r_{\text{ВН}}$ может быть успешно применено и при моделировании работы АБ.

Заключение. Таким образом, для определения технического состояния АБ может быть использовано внутреннее сопротивление. Экспериментальным путем установлена связь величины внутреннего сопротивления переменному току и емкости АБ при различной температуре электролита. Выполнены измерения внутреннего сопротивления стартерных свинцово-кислотных АБ типа 6СТ-190L(4) номинальной емкостью 190 А·ч и напряжением 12 В. Выявлено семейство зависимостей внутреннего сопротивления от степени заряженности батарей при различной температуре электролита.

Показано, что емкость АБ в диапазоне рабочих температур изменяется от 190 А·ч при температуре электролита 25 °С до 95 А·ч при температуре электролита минус 40 °С. Внутреннее сопротивление полностью заряженной батареи изменяется в диапазоне от 2,143 мОм при температуре электролита 25 °С до 4,1 мОм при температуре электролита минус 40 °С.

Установлено, что внутреннее сопротивление АБ, измеренное методом переменного тока частотой 10 Гц, обладает большей чувствительностью, чем в области частот близких к 1000 Гц. Следовательно, применение при измерениях внутреннего сопротивления области частот 10 Гц предпочтительнее.

Автор благодарен коллективу ООО «РАЗ Тангстоун» и лично генеральному директору Васильеву Ю.В. за предоставленные для эксперимента образцы аккумуляторных батарей, а также заместителю генерального директора по научной работе ООО «АК Бустер» Алешкину А.А. за ценные советы при планировании эксперимента.

Список литературы

1. Чупин Д.П. Параметрический метод контроля эксплуатационных характеристик аккумуляторных батарей: дисс. ... канд. техн. наук: 05.11.13. Омск, 2014. 203 с.

2. Афанасьев В.М., Григорьев А.С., Клестов К.А., Павлов Д.В., Печак В.В. Измерение внутреннего сопротивления свинцово-кислотного аккумулятора в режиме его зарядки // Электрохимическая энергетика. 2014. Т. 14. № 3. С. 164–169.

3. ГОСТ Р МЭК 60285-2002. Аккумуляторы и батареи щелочные. Аккумуляторы никель-кадмиевые герметичные цилиндрические. Введ. 01.07.2003. М.: Изд-во стандартов, 2003. 15 с.

4. ГОСТ Р МЭК 61960-2007. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочные и другие некислотные электролиты. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи литиевые для портативного применения. Введ. 27.12.2007. М.: Стандартинформ, 2008. 10 с.

5. ГОСТ Р МЭК 60896-21-2013. Батареи свинцово-кислотные стационарные. Часть 21. Типы с регулирующим клапаном. Методы испытаний. Введ. 22.11.2013. М.: Стандартинформ, 2014. 31 с.

6. ГОСТ Р МЭК 60896-11-2015. Батареи свинцово-кислотные стационарные. Открытые типы. Общие требования и методы испытаний. Введ. 20.11.2015. М.: Стандартинформ, 2016. Часть 11. 15 с.

7. ГОСТ Р 53165-2008. Батареи аккумуляторные свинцовые стартерные для автотракторной техники. Общие технические условия. Введ. 01.07.2009. М.: Стандартинформ, 2009. 33 с.

8. Алёшкин А.А., Бубнов Ю.И., Протопопов В.Х., Ягнятинский В.М. Метод оперативной диагностики основных эксплуатационных параметров свинцовых аккумуляторов (батарей) // Матер. 9-й междунар. конф. по свинцово-кислотным аккумуляторам LABAT 2014. Sofia: Lead-Acid Batteries Department institute of Electrochemistry and Energy Systems, Bulgarian Academy of Sciences, 2014. С. 197−200.

Постников Александр Александрович, начальник учебной лаборатории, aapostnikov@mail.ru, Россия, Рязань, Рязанское гвардейское высшее воздушно-десантное командное училище

EXPERIMENTAL STUDY CHANGES IN INTERNAL RESISTANCE LEAD-ACID BATTERY

A.A. Postnikov

The description and results of measurements of the internal resistance of the battery at different levels of charge and temperature of the electrolyte are given. It was found that the parameter change in the AB voltage has a greater sensitivity when exposed to alternating current in the frequency range less than 20 Hz.

Key words: capacity, technical condition, degree of charge, internal resistance.

Postnikov Alexander Alexandrovich, head of the training laboratory, aapostnikov@mail.ru, Russia, Ryazan, Ryazan guards higher airborne command school

УДК 621.311.25

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МОДУЛЯМИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ КУБА

Д.Д. Герра, Э.В. Яковлева, Я.Э. Шклярский

В статье представлены результаты моделирования в среде Matlab/Simulink различных электрических компонентов, составляющих солнечную электростанцию (СЭС) мощностью 5 кВт, подключенных к электрической сети региона Сантьяго-де-Куба (Республика Куба). Разработанная модель позволяет исследовать вольт-амперные характеристики (ВАХ) солнечных модулей в зависимости от таких метеорологических условий, как интенсивность солнечного излучения, температура окружающей среды, относительная влажность и скорость ветра, как для стационарных СЭС, так и для СЭС с системами слежения за солнцем. Кроме того, с помощью математической модели однофазного солнечного инвертора и однофазного электрического трансформатора, реализованного в программе, возможно исследовать поведение электрических переменных системы, таких как активная, реактивная и полная мощности, коэффициент мощности системы. В заключение следует отметить, что разработанная модель позволяет исследовать системы подключения СЭС к сети с учетом специфических климатических условий региона.

Ключевые слова: моделирование, солнечная электростанция, система слежения за солнцем, ВАХ солнечного модуля.

В данной статье описаны следующие этапы проведенных исследований - анализ существующей системы электроснабжения в регионе, моделирование солнечного модуля и системы слежения, включающее в себя моделирование движения Солнце по небосводу в данном регионе, произведенном на основании анализа метрологических особенностей региона, моделирование инвертора и трансформатора. Заключительным этапом было экспериментальное исследование СЭС в метрологических условиях региона Сантьяго де Куба.

В настоящее время экспериментальная фотоэлектрическая СЭС мощностью 5 кВт в провинции Сантьяго-де-Куб вырабатывает около 13,2 МВтч электроэнергии в год, которая поступает в электросеть региона. Она имеет 20 солнечных модулей с максимальной мощностью 250 Вт, которые образуют две цепи из 10 фотоэлектрических модулей с максимальной

мощностью 2,5 кВт каждая. Каждая цепь подключена к однофазному инвертору с максимальной мощностью 5 кВт, который подключен к низковольтной электрической сети напряжением 240 В. Затем через 500 м система подключается к национальной электрической системе через распределительный трансформатор 75 кВт, который подает питание на другие электрические нагрузки, подключенные к электрической системе.

Электротехнический комплекс с СЭС в мощностью 5 кВт состоит из 4 блоков. Первый блок состоит из фотоэлектрического генератора (5 кВт), который отвечает за преобразование солнечного излучения в электричество (DC), второй блок состоит из однофазного инвертора (5 кВт), который отвечает за преобразование сигнала постоянного тока в переменном токе (переменном токе) после преобразования электрических сигналов. Третий блок соединяет выход инвертора с номинальным напряжением 240 В с национальной электрической сетью (четвертый блок 4) 240 В через сетевой трансформатор. Данный комплекс служит для обеспечения электроэнергией потребителей в этом регионе.

Рядом с СЭС находится метеорологическая станция, которая измеряет данные глобальной горизонтальной радиации, скорости ветра, температуры окружающей среды, относительной влажности и атмосферного давления.

Данные, полученные с метеорологической станции, вводятся в математическую модель, разработанную в среде Matlab/Simulink, для моделирования фактических условий работы фотоэлектрической системы мощностью 5 кВт.

Моделирование электротехнического комплекса с фотоэлектрической системой. Модель, реализованная в программном обеспечении Matlab для моделирования фотоэлектрической системы мощностью 5 кВт, представлена на рис. 1. Модель позволяет изучать основные электрические переменные, составляющие систему подключения к солнечной сети, с учетом конкретных погодных условий в регионе.

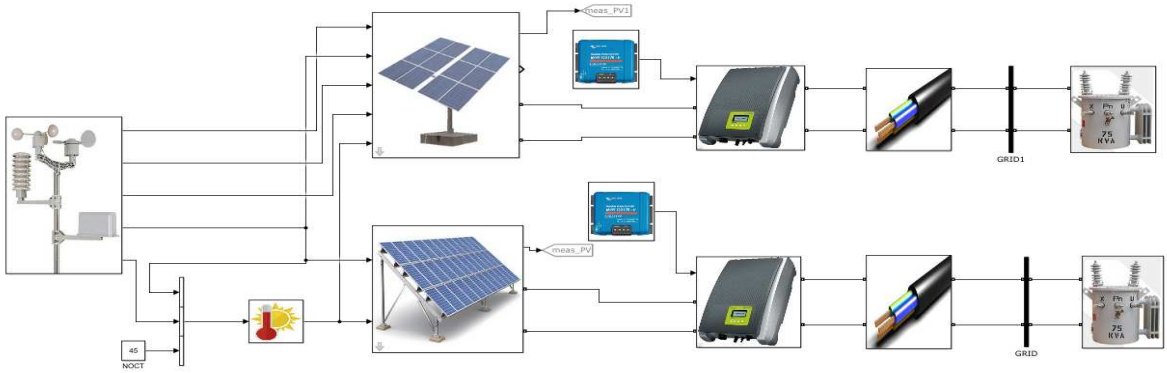


Рис. 1. Модель электротехнического комплекса с фотоэлектрической системой мощностью 5 кВт в программной среде MATLAB / SIMULINK

Для исследований был использован стандартный модуль кремния, который состоит из солнечных элементов, соединенных последовательно и/или параллельно через металлический проводник. Эквивалентная схема солнечной батареи представляет собой неосвещенный диодный p/n выпрямитель, при падении света на который, создается электрический фототок [1].

Уравнения, описывающие модель солнечной батареи представлены далее.

$$A = e^{\frac{V_{oc}}{n*V_T}} - 1\,, \tag{1}$$

$$B = e^{\frac{I_{sc}*R_S}{n*V_T}} - 1, \tag{2}$$

$$I_{sc} = I_{scm} * N_{cp} + \beta\,*(T_c - Tstc), \tag{3}$$

$$V_{oc} = V_{ocm} - 0.0023 * (T_c - Tstc) * N_{cs}, \tag{4}$$

$$I = \frac{I_{sc} * \left(1 + \frac{R_S}{R_{sh}}\right) - V_{oc} * \left(\frac{B}{A}\right)}{1 - \frac{B}{A}} * \frac{G}{G_{stc}} - \\ - \left(\frac{I_{sc}*\left(1+\frac{R_S}{R_{sh}}\right) - V_{oc}*\left(\frac{B}{A}\right)}{A-B} - \frac{V_{oc}}{A*R_{sh}}\right) * \left(e^{\frac{V+I*R_S}{n*V_T}} - 1\right) - \frac{V+I*R_S}{R_{sh}}\,, \tag{5}$$

где R_s - последовательное сопротивление [Ом]; R_{sh} - параллельное сопротивление [Ом]; n- диод; I_{sc} - ток короткого замыкания при нормальных условиях работы (СТУ) [А]; *VT* -напряжение тепловое диодное [мВ]; V - рабочее напряжение [В]; *I* - рабочий ток [А]; *Voc* -напряжение разомкнутой цепи при стандартном тестовом условии (СТУ) [В]; β - температурный коэффициент тока короткого замыкания; G_{stc} - солнечное излучение при нормальных условиях работы (СТУ) [Вт/м^2], *G* - солнечное излучение [Вт/м^2]; N_{cs} - количество солнечных элементов, соединенных последовательно в солнечном модуле [Ом]; N_{cp} - число солнечных элементов, соединенных параллельно в солнечном модуле [Ом]; T_c - температура батареи [°C]; T_{stc} - температура батареи при стандартных тестовых условиях [25°C].

Технические характеристики солнечной панели HELIEHE (модель HEE215M): максимальная мощность - 250 Вт, напряжение холостого хода - 37.4 В, ток короткого замыкания - 8.72 А, напряжение при максимальной мощности - 30.3В, ток при максимальной мощности - 8.22 А, коэффициент температуры по току I_{sc} - 0.0156 %/*C, коэффициент температуры по напряжению V_{oc} - 0.315 %/*C, последовательное сопротивление - 0.3347 **Ω**, параллельное сопротивление - 422.06 **Ω**, тип кремния - моно-кристалл (рис. 2).

Система слежения за солнцем, используемая в данном исследовании, функционирует следующим образом. Специальные направляющие ориентируют солнечные панели таким образом, чтобы угол падения солнечных лучей на поверхность солнечной панели составлял 90 градусов для того, чтобы максимизировать улавливаемую энергию (рис. 3). В фотоэлектрических системах направляющие позволяют минимизировать угол паде-

ния лучей, то есть угол, который луч света создает с линией, перпендикулярной поверхности, между входящим светом и панелью, что увеличивает количество энергии, которая система производит [2, 3].

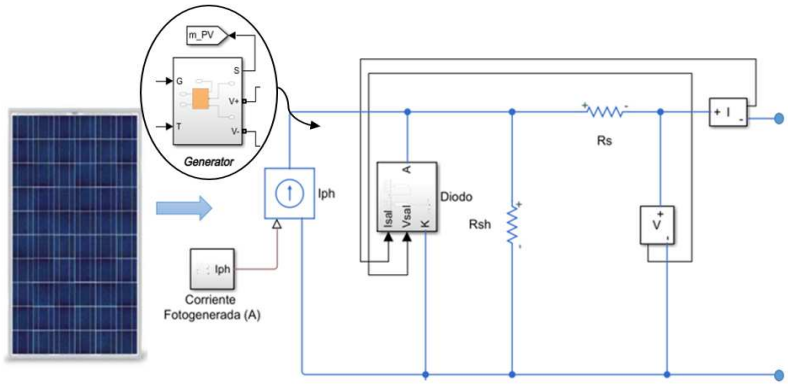


Рис. 2. Математическая модель солнечного модуля HELIENE (модель HEE215M)

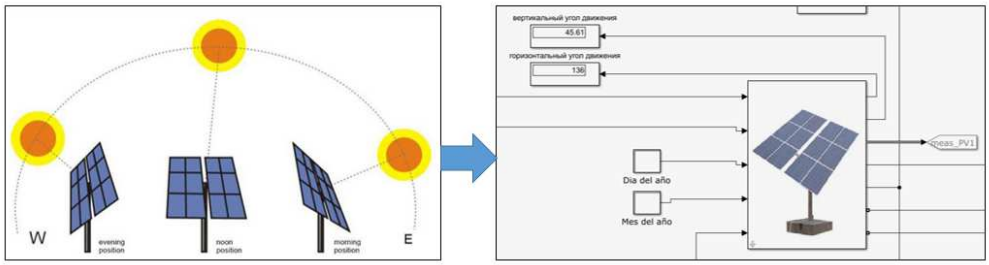


Рис. 3. Система слежения за солнцем, реализованная в среде в MATLAB/SIMULINK

Углы, которые определяют движение солнечного трекера в горизонтальном движении (∝) и вертикальном движении (γ), описываются следующими уравнениями [3]:

$$\delta = 23.45 * sin\left(\frac{360*(284+n)}{365}\right), \quad (6)$$

$$E = 9.87 * sin\left(2 * \frac{360}{364} * (n-81) * n\right) - 7.53 * cos\left(\frac{360}{364} * (n-81) * n\right) - -1.5 * sen\left(\frac{360}{364} * (n-81) * n\right), \quad (7)$$

$$HS = HF + E + 4 * \left(L_{Lef} - L_{Loc}\right), \quad (8)$$

$$w = -\left(\frac{15}{h}\right) * HS + 180, \quad (9)$$

$$\propto = sen^{-1}\left(cos(\varphi) * cos(\delta) * cos(w) + sin(\delta) * sin(\varphi)\right), \quad (10)$$

$$\gamma = tan^{-1}\left(\frac{sen(w)}{tan(\delta)*cos(\varphi)-sin(\varphi)*cos(w)}\right), \quad (11)$$

где δ - угол солнечного склонения [°]; n - дни года (1…365 дней); E- уравнение времени; H_S- солнечное время [час]; H_F - официальное время [час]; L_{lef} - длина опорного меридиана; L_{loc} - длина меридиана; w - угол солнечного времени [°], ∝ - солнечный угол высоты [°]; γ - угол Asimut [°].

Поток солнечной радиации на горизонтальной поверхности Земли зависит от нескольких факторов, наиболее значимыми из которых являются: широта, время года, время суток и состояние атмосферы. Из-за присутствия атмосферы мы отличаем от глобальной радиации (G), падающей на любую поверхность, прямую и диффузную фракции [4, 5].

Для расчета солнечного излучения на горизонтальной поверхности на земле необходимо записать тригонометрические зависимости между положением солнца на небе и координатами на земле.

Ниже приведены уравнения для расчета падающего горизонтального излучения на наклонной плоскости [4, 6]:

$$\cos(\theta_z) = sin(\delta) * sin(\varphi) + cos(\delta) * cos(\varphi) * cos\big((h - 12) * 15\big), \quad (12)$$

$$cos(\theta) = cos(\beta) * cos(\theta_z) + sin(\beta) * sin(\theta_z) * \\ * cos\left(\frac{cos(\delta) * sin\big((h-12)*15\big)}{cos(90-\theta_z)} - \gamma\right), \quad (13)$$

$$k = \frac{G}{G_0 * cos(\theta_z)}, \quad (14)$$

$$(0.22 < k < 0.8) \rightarrow f = \\ = 0.9511 - 0.1604 * k + 4388 * k^2 - 16.638 * k^3 + 12.336 * k^4;$$

$$(k \leq 0.2) \rightarrow f = 1 - 0.09;$$

$$(k > 0.8) \rightarrow f = 0.165 \quad (15);$$

$$I_t = (1 - f) * G * \frac{\cos(\theta)}{cos(\theta_z)} + f * G * \frac{1+\cos(\varphi)}{2} + G * \rho * \frac{1-\cos(\varphi)}{2}, \quad (16)$$

где δ- угол солнечного склонения [°]; θ_z- зенитальный угол [°]; φ - широта местности [°]; h - время суток [час]; β - угол наклона солнечной панели относительно горизонтали [°]; k – фактор; G- солнечное излучение в горизонтальной плоскости [Вт/м^2]; $G_0 = 1365$ - солнечная постоянная [Вт/м^2]; ρ - коэффициент отражения почвы [4, 18].

Важным компонентом СЭС является преобразователь, который имеет в своем составе повышающий преобразователь напряжения (DC/DC-преобразователь) от 200 до 700 В, трехфазный инвертор, выполненный на основе IGBT-модулей по трехфазной мостовой схеме, пропорционально-интегральные регуляторы тока и напряжения (ПИ). Время открытия и закрытия IGBT-модулей составляет несколько миллисекунд, что позволяет эффективно использовать принцип широтно-импульсной модуляции для получения синусоидальных напряжений на выходе инвертора.

Генератор PWM отвечает за доставку сигнала переключения на полупроводниковые устройства питания. Для этой системы использовалась синусоидальная модуляция по ширине униполярного импульса. Основная частота модулированной волны должна иметь значение, равное значению желаемого выхода, в этом случае желаемая частота равна 60 Гц [5, 7-9]. Ступень питания состоит из полупроводниковых переключающих устройств, в этом случае смоделирована полная система мостового преобразования типа постоянного тока в переменный, сигналы управления переключением устройств доставляются генератором PWM.

Напряжение на каждой из клемм инвертора представлено в следующих уравнениях (17) – (23) [5, 13-17]:

$$V_a = \begin{cases} V_s, (\ u_m \geq u_c) \\ 0, (\ u_m < u_c) \end{cases}, V_b = \begin{cases} V_s, (-u_m \leq u_c) \\ 0, (-u_m > u_c) \end{cases}. \quad (17)$$

Выходное напряжение описывается следующим образом:

$$V_c = (V_a - V_b), \quad (18)$$

$$L\frac{di_L}{dt} = (2u-1) * (1-m) * V_p + m * V_s - i_L * R - V_c, \quad (19)$$

$$C\frac{dv_s}{dt} = (1-2u) * m * i_L. \quad (20)$$

Уравнение преобразования мощности BOOST:

$$\frac{Ld_i}{dt} = V_i - (1-D) * V_c, \quad (21)$$

$$\frac{Cd_v}{dt} = (1-D) * I_L - \frac{V_c}{R}, \quad (22)$$

$$V_o = \frac{V_i}{1-D}. \quad (23)$$

Математические выражения, которые описывают эквивалентную схему, можно записать следующим образом:

$$u_p = R_p * i_p + L_{dp} * \frac{di_p}{dt} + N_p * \frac{d\emptyset_{Fe}}{dt}, \quad (24)$$

$$u_s = R_s * i_s + L_{ds} * \frac{di_s}{dt} + N_s * \frac{d\emptyset_{Fe}}{dt}, \quad (25)$$

где R_p - сопротивление первичной обмотки [Ом]; R_s - вторичное сопротивление [Ом]; I_p - первичный ток [А]; I_s - вторичный ток [А]; L_{dp} - первичная индуктивность; L_{ds} - вторичная индуктивность; N_p - число витков первичной обмотки; N_s - число витков вторичной обмотки [10-12].

Для того, чтобы проверить эффективность моделирования с помощью MATLAB/SIMULINK, был проведен эксперимент с использованием сетевого анализатора модели Fluke 430. С помощью измерительного оборудования были получены данные об энергии, которая поступает на вход инвертора солнечной СЭС мощностью 5 кВт, данные об окружающей среде, были получены с метеостанции.

На рис. 4 представлены результаты экспериментальных натурных исследований и компьютерного моделирования. Красная кривая представляет данные, рассчитанные программой MATLAB, а синяя кривая представляет значения, полученные экспериментально, эти две кривые были получены при одинаковых климатических условиях исследуемого региона.

Результаты, показанные на рис. 4, показывают эффективность математической модели, разработанной для солнечной системы мощностью 5 кВт, поскольку разница между средней рассчитанной энергией (18,1 кВтч) и средней измеренной реальной энергией (17,4 кВтч) составляет 0,7 МВтч. Разница между обеими кривыми составляет 4% от фактической измеренной энергии.

Результаты, полученные при моделировании солнечной исследовательской системы мощностью 5 кВт в MATAB / SIMULINK приведены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, для тех же смоделированных климатических условий в регионе Сантьяго-де-Куба, энергия, получаемая с помощью системы слежения за солнцем, на 20% выше по сравнению со стационарной

системой, что подтверждает тот факт, что системы слежения являются эффективной альтернативой улучшения параметров эффективности солнечных электростанций и увеличения производства энергии.

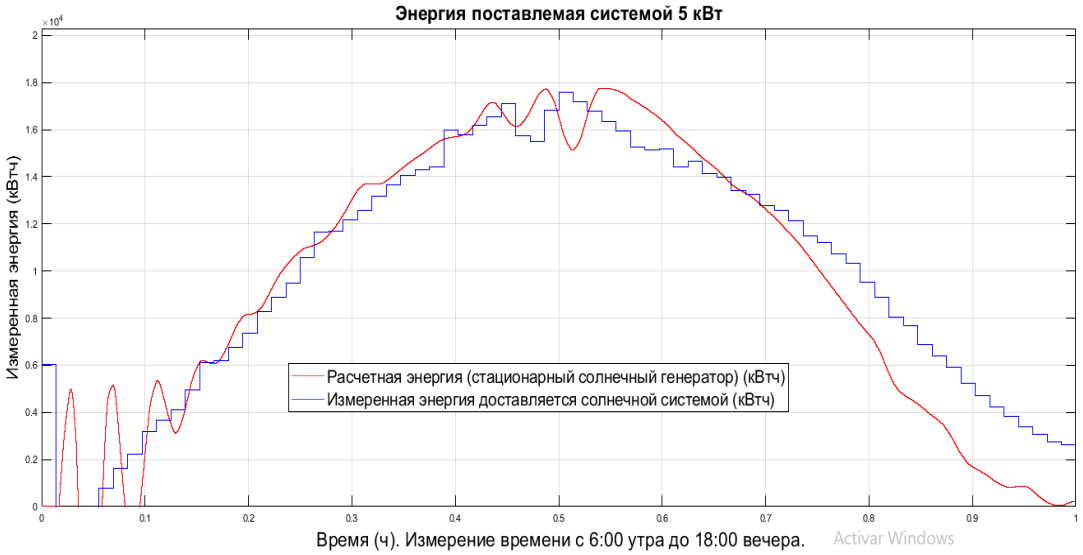


Рис. 4. Валидация данных, рассчитанных по математической модели СЭС мощностью 5 кВт в MATLAB/SIMULINK

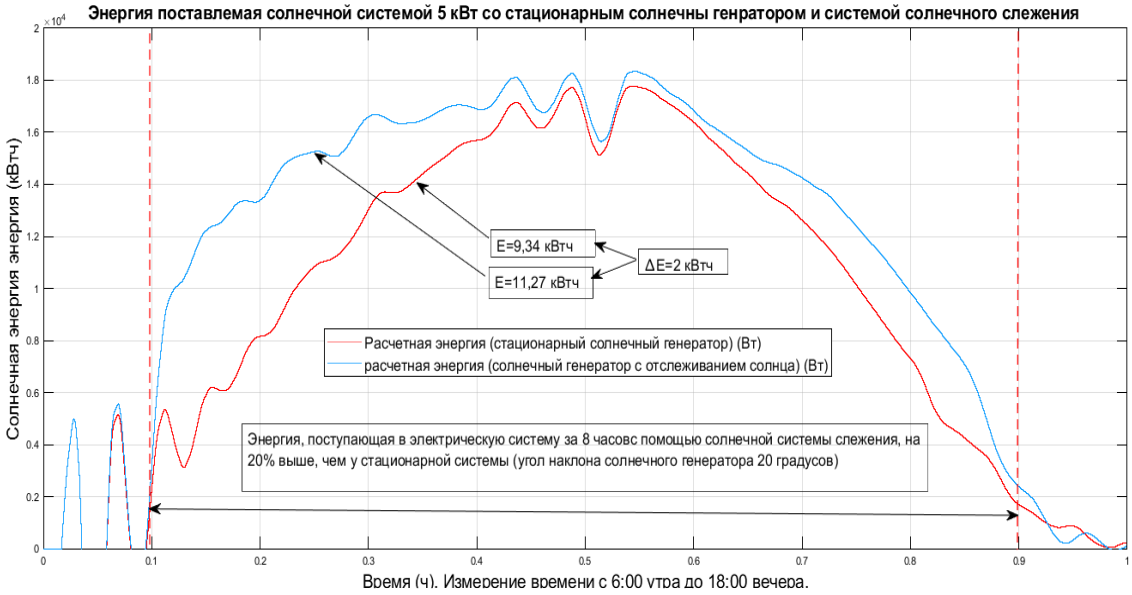


Рис. 5. Сравнение энергии, вырабатываемой солнечной системой мощностью 5 кВт с системой слежения за Солнцем и стационарным солнечным генератором с наклоном 20 градусов

Заключение. Согласно результатам проведенного исследования, было подтверждено, что системы слежения за солнцем являются альтернативным способом повышения эффективности солнечных электростанций, увеличения генерации объемов электрической энергии, доставляемой в электроэнергетическую систему региона, к которому подключена электростанция. Исследование показывает, что энергия, улавливаемая солнечной электростанцией с системой слежения за солнцем, увеличивается на 20%

по сравнению с системами, в которых отсутствует система слежения. Эти результаты были получены в конкретных климатических условиях региона Сантьяго-де-Куба, Республика Куба.

Список литературы

1. Metodología para el análisis técnico de la masificación de sistemas fotovoltaicos como opción de generación distribuida en redes de baja tensión, Johann Alexander Hernández Mora, Universidad Nacional, facultad de ingeniería, Bogotá, Colombia, 2012. 112 p.

2. Cómo funciona un seguidor solar, Web Año 2018. [Электронный ресурс] URL: https://www.lbaindustrial.com.mx/seguidor-solar/ (дата обращения: 10.02.2020).

3. Diseño y construcción de un sistema de seguimiento fotovoltaico, Jonathan S.F, Universidad tecnológica de la Mixteca. Marzo 2012. Huajuapan de León, Oaxaca. 2012. 98 p.

4. Fundamentos de Energía Solar Térmica, Emiliano Sierra, CI 4230513-5, nov. 2010. 19 p.

5. Diseño y análisis del desempeño de un inversor de voltaje utilizando controladores inteligentes, Juan S.S, Ecuador 2011. 10 p.

6. Rezk H., Hasaneen E.S. A new MATLAB/Simulink model of triple-junction solar cell and MPPT based on artificial neural networks for photovoltaic energy systems. Ain Shams Engineering Journal, 2015. 6(3). P. 873–881. DOI: http://doi.org/10.1016/j.asej.2015.03.001.

7. Setiawan E.A., Setiawan A., Siregar D. Analysis on solar panel performance and PV-inverter configuration for tropical region. Journal of Thermal Engineering, 2017. 3 (3). P. 1259–1270. DOI: http://doi.org/10.18186/journal-of-thermal-engineering.323392.

8. Muñoz J., Martı´nez-Moreno F., Lorenzo E. On-site characterisation and energy efficiency ofgrid-connected PV inverters // Progress in photovoltaics: research and applications. IES. UPM. España, 2010.

9. Reyes-Caballero F., Fernández-Morales F., Duarte J. Panorama energético. Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación, 2016. 7 (1). P. 151-163. DOI: http://dx.doi.org/10.19053/20278306.v7.n1.2016.5605.

10. Icaza-Alvarez D., Calle-Castro C.J., Cordova-Gonzalez F., Lojano-Uguna A., Toledo-Toledo J.F. Modeling and Simulation of a hybridsystem Solar panel and wind turbine in the locality of Molleturo in Ecuador. In 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications. San Diego: IEEE. 2016. 5. P. 620–625. DOI: http://doi.org/10.1109/ DISTRA.2017.8191134.

11. Li Y., Huang W., Huang H., Hewitt C., Chen Y., Fang G., Carroll DL. Evaluation of methods to extract parameters fromcurrent-voltage characteristics of solar cells. Solar Energy 2013. 90. P. 51–57.

12. Acevedo-Luna A., Morales-Acevedo A. Study of validity of the single-diode model for solar cells by I–V curves parameters extraction using a simple numerical method // Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018. P. 1–7.

13. Smets A., Jager K., Isabella O., Van Swaaij R., Zeman M. Solar Energy: The Physicsand Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems. UK: Uit Cambridge. 2016.

14. Silvestre S., Castanar L., Guasch D. Herramientas de Simulacion para Sistemas Fotovoltaicos en Ingenieria. Formacion Universitaria, 2008. 1 (1). P. 13–18. DOI: http://doi.org/10.4067/S0718-50062008000100003.

15. Barbaro P.V., Cataliotti A., Cosentino V., Nuccio S. A novel approach based on nonactive power for the identification of disturbing loads in power systems // IEEE Transactions on Power Delivery. 2007. Vol. 22. P. 1782-178.

16. Solovev S.V. Efficiency estimation method of three-wired AC to DC line transfer / S.V. Solovev, A.I. Bardanov // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015. P. 032137.

17. Shklyarskiy Y.E., Dobush V.S., Bardanov A.I. An algorithm for prediction of the DC link voltage of the VFD during voltage sags // Proceedings of the 2018 IEEE conference of Russian young researchers in electrical and aelectronic engineering, ElConRus, 2018. P. 763-767.

18. Yang Hong Geng Assessment for harmonic emission level from one particular customer: University of Liege, 1992. 7 p.

Герра Диаз Даниэль. аспирант, dgd210386@gmail.com, Россия, Санкт-Петербургский горный университет,

Эмилия Владимировна Яковлева, канд. техн. наук, доцент, yakovleva_ev@pers.spmi.ru, Россия, Санкт-Петербургский горный университет,

Шклярский Ярослав Элиевич, д-р техн. наук, профессор, Shklyarskiy_YaE@pers.spmi.ru, Россия, Санкт-Петербургский горный университет

MATHEMATICAL MODELING OF A SOLAR POWER PLANT IN THE CLIMATIC CONDITIONS OF THE REPUBLIC OF CUBA

D.D. Guerra, E.V. Iakovleva, Y.E. Shklyarskiy

The article presents the simulation results of various electrical components that make up a solar power plant (SES) with a capacity of 5kW, connected to the electric network of the region of Santiago de Cuba (Republic of Cuba) in a Matlab/Simulink environment. The developed model allows us to study the current – voltage characteristics (I–V) of solar modules depending on meteorological conditions such as solar radiation intensity, ambient temperature, relative humidity and wind speed, both for stationary SES and for SES with tracking systems for the sun In addition, using the mathematical model of a single-phase solar inverter and a single-phase electric transformer implemented in the program, it is possible to study the behavior of electric storage systems, such as active, reactive and apparent power, system power factor. In conclusion, it should be noted that the developed model allows us to study the systems for connecting SES to the network, taking into account the specific climatic conditions of the region.

Key words: modelling, solar plant, sun tracking system, solar module current – voltage characteristic.

Guerra Diaz Daniel, postgraduate, dgd210386@gmail.com, Russia, Saint Petersburg, Saint-Petersburg Mining University,

Emilia Vladimirovna Yakovleva, candidate of technical sciences, docent, yakovleva_ev@pers.spmi.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University,

Shklyarskiy Yaroslav Eleivich, doctor of technical science, professor, Shklyarskiy_YaE@pers.spmi.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University

УДК 621.311.1.018.3

ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НА КАЧЕСТВО НАПРЯЖЕНИЯ И НА РАБОТУ КОНДЕНСАТОРНЫХ БАТАРЕЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

В.Н. Костин, В.А. Сериков, А.В. Кривенко

На основе компьютерного моделирования выполнен анализ режимов работы систем электроснабжения с нелинейной и линейной нагрузками. Рассмотрены режимы суточного изменения линейной нагрузки и соответствующего регулирования мощности конденсаторной батареи для типового ряда трансформаторов 110/10 кВ мощностью 25 … 80 МВА. Установлено, что выделение нелинейной нагрузки на отдельную секцию шин недостаточно для обеспечения требуемого качества напряжения на шинах линейной нагрузки и допустимой загрузки конденсаторной батареи токами высших гармоник. Показано, что включение последовательно с конденсаторами антирезонансных реакторов с частотой расстройки p = 7 % полностью устраняет проблемы с токовой перегрузкой конденсаторов высшими гармониками и с качеством напряжения на секции с линейной нагрузкой.

Ключевые слова: система электроснабжения, моделирование, высшие гармоники, качество напряжения, конденсаторная батарея, антирезонансный реактор.

В современных системах электроснабжения (СЭС) неизменно присутствуют элементы с нелинейными вольтамперными характеристиками. Следствием их работы является искажение кривых тока и напряжения, т.е. в электрических сетях появляются высшие гармоники. В промышленных сетях источниками высших гармоник являются, главным образом, статические вентильные преобразователи, а также сварочные аппараты, дуговые сталеплавильные печи и другие нелинейные нагрузки.

Кроме искажения формы напряжения высшие гармоники тока вызывают дополнительные потери напряжения и дополнительный нагрев элементов СЭС, резонансные явления на частотах высших гармоник, приводящие к токовой перегрузке косинусных конденсаторов, наводки в телекоммуникационных и управляющих сетях, акустический шум в электромагнитном оборудовании, вибрацию в электрических машинах и др [2, 10 - 13].

Исследованиям несинусоидальных режимов в СЭС посвящено достаточно много работ, в частности [1, 2, 8, 9]. В указанных работах выбранная высшая гармоника представляется источником тока соответствующей частоты и анализируется процесс растекания этой гармоники в упрощенной однофазной модели СЭС. Отсутствуют работы, в которых бы рассматривались процессы формирования, изменения по величине и растекания высших гармоник тока в трехфазной модели СЭС с непосредственным источником этих гармоник – вентильным преобразователем.

Известны меры подавления высших гармоник. Это применение пассивных и активных фильтров гармоник [3], антирезонансных дросселей [7] и др. Из схемных решений используются подключение нелинейной нагрузки к системе с большей мощностью короткого замыкания и выделение нелинейных нагрузок на отдельную секцию шин [6].

В статье на базе трехфазной компьютерной модели рассматриваются несинусоидальные режимы работы СЭС (рис. 1), в которой источником питания служит система С и трансформатор Т напряжением 110/10 кВ с расщепленной обмоткой низшего напряжения, от которого питаются нелинейная (выпрямитель В) и линейная Н нагрузки с конденсаторной батареей (КБ) для компенсации реактивной мощности линейной нагрузки. Нелинейная нагрузка выделена на отдельную секцию шин (1 с). К другой секции шин (2 с.) подключены линейная нагрузка и КБ.

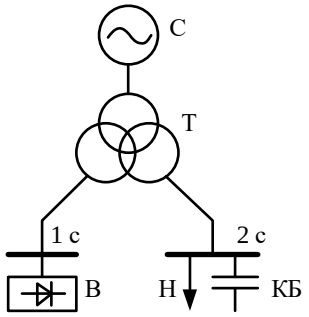


Рис. 1. Схема исследуемой СЭС

Исследования режимов СЭС для случая подключения линейной и нелинейной нагрузок к одной секции выполнено в [5, 11]. Установлено, что при суточном изменении линейной нагрузки и соответствующем изменении мощности КБ не удается избежать резонансных режимов, в которых перегрузки КБ токами высших гармоник оказываются недопустимыми и не выполняются нормативные требования к качеству напряжения.

В качестве аппарата исследования выбран программный комплекс *Multisim*, позволяющий выполнять практически мгновенную визуализацию процессов и анализ режимов различных электрических и электронных схем.

Модель СЭС. Система С моделировалась трехфазным источником напряжения бесконечной мощности. Остальные элементы СЭС моделировались параметрами, рассчитанными для первой гармоники.

Элементы, имеющие активно-индуктивные сопротивления, в частности линейная нагрузка, представлялись последовательным соединением индуктивности L и активного сопротивления R. У таких элементов индуктивное сопротивление увеличивалось пропорционально номеру гармоники, а активное сопротивление оставалось неизменным. Однако ток гармоники в активном сопротивлении уменьшался в соответствии с увеличением индуктивного сопротивления. По мнению авторов, такое представление линейной нагрузки с большей точностью моделирует нагрузку для всего спектра гармоник, чем параллельное включение L и R.

Рассматривался типовой ряд трансформаторов напряжением 110/10 кВ с расщепленной обмоткой низшего напряжения и номинальными мощностями $S_{\text{т ном}}$ = 25, 40, 63 и 80 МВА.

Параметры трансформатора определялись по его справочным данным [4]:

обмотка высшего напряжения:

$$R_{\text{тв}} = 0{,}5 \cdot P_{\text{к}} \cdot \left(\frac{U}{S_{\text{т ном}}} \right)^2;\ L_{\text{тв}} = \frac{U_{\text{к}}}{100 \cdot \omega} \cdot \frac{U^2}{S_{\text{т ном}}} \cdot \left(1 - \frac{K_{\text{р}}}{4} \right); \qquad (1)$$

обмотки низшего напряжения:

$$R_{\text{тн}} = P_{\text{к}} \cdot \left(\frac{U}{S_{\text{т ном}}} \right)^2;\ L_{\text{тн}} = \frac{U_{\text{к}}}{100 \cdot \omega} \cdot \frac{U^2}{S_{\text{т ном}}} \cdot \frac{K_{\text{р}}}{2}, \qquad (2)$$

где U – номинальное линейное напряжение расщепленной вторичной обмотки трансформатора; $\Delta P_{\text{к}}$ – потери короткого замыкания; $U_{\text{к}}$, % – напряжение короткого замыкания; $k_{\text{р}}$ = 3,5 – коэффициент расщепления; $\omega = 2\pi f = 314$.

Параметры линейной нагрузки $R_{\text{н}}$ и $L_{\text{н}}$ определялись по выражениям:

$$R_{\text{н}} = \frac{U^2}{P_{\text{н}}} \cdot \cos^2 \varphi;\ L_{\text{н}} = \frac{U^2}{\omega \cdot Q_{\text{н}}} \cdot \sin^2 \varphi. \qquad (3)$$

При моделировании режима полагалось, что линейная нагрузка имеет естественный коэффициент мощности $\cos\varphi$ = 0,7 … 0,8.

Конденсаторная батарея КБ моделировалась емкостями $C_{\text{к}}$. Емкости конденсаторов $C_{\text{к}}$, включенных по схеме «звезда» или «треугольник», через мощность батареи $Q_{\text{к}}$ и определялись, соответственно, по выражениям

$$C_{\text{к}} = \frac{Q_{\text{к}}}{\omega \cdot U^2} \text{ или } C_{\text{к}} = \frac{Q_{\text{к}}}{3\omega \cdot U^2}. \qquad (4)$$

Нелинейная нагрузка моделировалась трехфазным мостовым выпрямителем на виртуальных диодах $D1$-$D6$. Нагрузкой выпрямителя служило активное сопротивление R_d. Для сглаживания пульсаций выпрямленного тока последовательно с нагрузкой R_d включалась индуктивность L_d. Величина сопротивления R_d определялась через мощность нелинейной нагрузки по следующему выражению:

$$R_d = \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} U^2 \right) \cdot \frac{1}{P_d}. \quad (5)$$

В отличие от работ [1, 2, 8, 9], где нелинейная нагрузка задавалась одним источником тока неизменной величины с заданной частотой, мостовой выпрямитель сам генерировал весь спектр гармоник тока, величины которых, как показано в [11], определялись режимом работы СЭС.

В рассматриваемой СЭС при пренебрежении активными сопротивлениями можно выделить колебательный *LC*-контур, в котором возможен резонанс токов. В однофазном представлении схемы СЭС этот контур будет образован индуктивностями $L_{тн}$, $L_н$, $L_{вн}$ и емкостью $C_к$ (рис. 2).

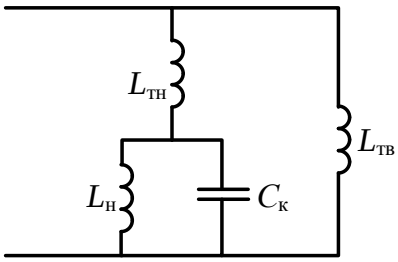


Рис. 2. Колебательный контур

Запишем выражение сопротивления левой ветви этого контура для *n*-ой гармоники:

$$X_{\sum.n} = X_{тн.n} - \frac{X_{н.n} \cdot X_{к.n}}{X_{н.n} - X_{к.n}}. \quad (6)$$

Очевидно, что при условии $X_{к,n} > X_{н,n}$ сопротивление этой ветви будет носить индуктивный характер и резонансных явлений в контуре не будет.

Рассмотрим частный пример. Пусть линейная нагрузка $S_н = P_н + jQ_н = 8 + j6$ МВА. Коэффициент мощности cosφ = 0,8. Параметры нагрузки в соответствие с приведенными выше формулами $R_н$ = 8,8 Ом, $\omega L_н$ = 6,6 Ом. Выполним компенсацию реактивной мощности, для чего параллельно нагрузке подключим КБ мощностью $Q_к$ = 4 Мвар. Емкость фазы КБ и ее сопротивление соответственно составят $C_к$ = 0,115 мФ и $X_к$ = 28 Ом.

Видно, что условие $X_{к,n} > X_{н,n}$ выполняется лишь для первой гармоники (n = 1). Для высших гармоник ($n \geq 3$) условие $X_{к,n} > X_{н,n}$ никогда не выполнится.

Резонанс будет иметь место, если для какой-то *n*-ой гармоники сопротивление левой ветви будет иметь емкостной характер и, кроме того, будет выполняться условие:

$$X_{\sum.n} = X_{тв.n}. \quad (7)$$

В дальнейшем для обобщенности результатов моделирования все регулируемые мощности представлялись в относительных единицах (или в процентах) по отношению к номинальной мощности трансформатора:

мощность на стороне нелинейной нагрузки $P^*_d = P_d / S_{т\ ном}$;

мощность линейной нагрузки $P^*_{н} = P_н / S_{т\ ном}$;

мощность конденсаторной батареи $Q_к^* = Q_к / S_{т\ ном}$.

Компьютерная трехфазная модель СЭС представлена на рис. 3.

Предварительные расчеты без учета активных сопротивлений трансформатора и нагрузки показали, что в рассматриваемой схеме СЭС возможны резонансные явления на канонических гармониках n = 5, 7, 11, 13, 17, … генерируемых трехфазным мостовым выпрямителем. При суточном изменении мощности линейной нагрузки и соответствующем изменении мощности КБ резонансные явления следует ожидать при мощности КБ в диапазоне от 1 до 25 % от мощности трансформатора (табл. 1).

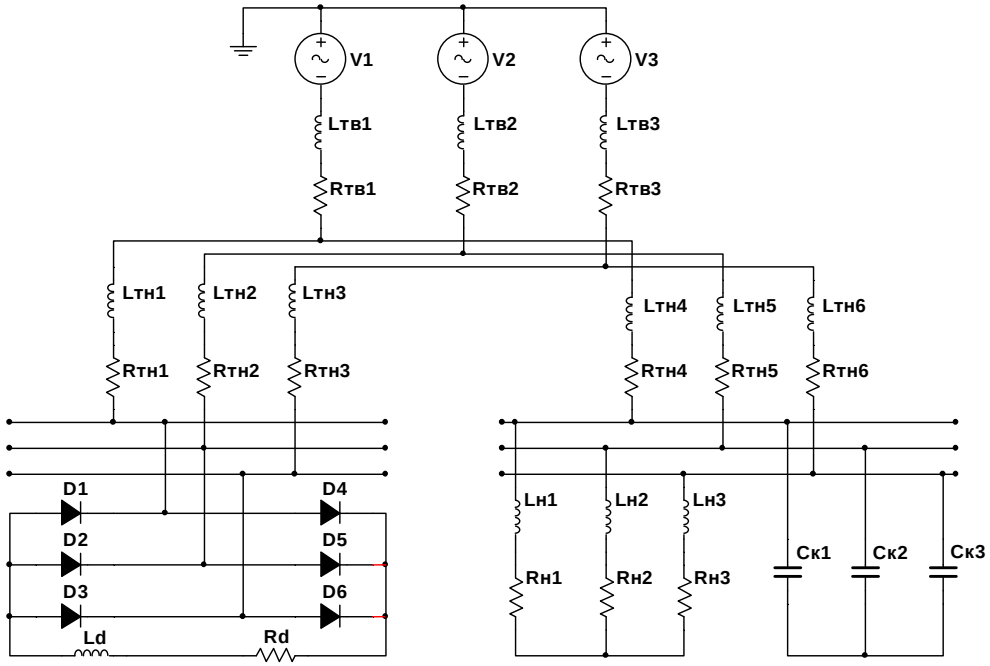


Рис. 3. Компьютерная модель исследуемой СЭС

Таблица 1

Мощности КБ, при которых возникают резонансные явления на гармониках n

n	5	7	11	13	17	19
$Q^*_к$, %	21 … 25	10,5 … 12	4,3 … 5	3 … 3,5	1,8 … 2,0	1,3 … 1,4

Видно, что резонанса на 5-й гармонике ожидать не следует вследствие очень большой мощности КБ (половина мощности одной обмотки низшего напряжения). Резонансы на 7, 11 и 13 гармониках вполне реальны. Резонансы на 17-й и более высоких гармониках практически маловероятны вследствие малой мощности КБ.

Для рассматриваемой СЭС установлено, что включение линейной нагрузки $K_З$ = 0,1…0,25 на шинах вторичной обмотки трансформатора нелинейной нагрузки оказывает несущественное влияние на значения резонансных мощностей КБ, равное диапазону инженерной погрешности (±5%).

Результаты моделирования. В трехфазной модели СЭС, приведенной на рис. 3, моделировалось суточное изменение линейной нагрузки ($L_н = var$ и $R_н = var$) в диапазоне мощности одной обмотки низшего напряжения трансформатора. Соответственно изменялась мощность КБ для поддержания коэффициента мощности на нормируемом уровне ($\cos \varphi > 0{,}9$).

При моделировании оценивались по измерительным приборам и через разложение в ряд Фурье:

суммарный ток $I_{\Sigma к}$ через КБ с последующим расчетом коэффициента перегрузки $K_{пер} = I_{\Sigma к} / I_{к\ ном}$;

суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U на секции шин линейной нагрузки.

Известно, что перегрузка конденсаторов токами высших гармоник не должна превышать 30 % ($K_{пер} < 1{,}3$).

В соответствии с ГОСТ 32144-2013 значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 5 % в течение 95% времени интервала в одну неделю и 8 % в течение 100% времени интервала в одну неделю.

Результаты моделирования возможных резонансных режимов для трансформаторов с расщеплением вторичной обмотки типового ряда номинальных мощностей $S_{т\ ном}$ = 25, 40, 63 и 80 МВА, загруженных нелинейной нагрузкой $P^*_d \approx 0{,}1$ и $P^*_d \approx 0{,}35$, сведены в табл. 2.

По табл. 2 видно, что в этих режимах коэффициент K_U выходит за допустимые пределы, а коэффициент $K_{пер}$ имеет значения выше предельно допустимых при $P^*_d \approx 0{,}1$ на 11 и 13 гармониках, а при $P^*_d \approx 0{,}35$ на 7,11 и 13 гармониках.

В работе [11] показано, что при загрузке трансформатора $P^*_d \approx 0{,}35$, но при подключении всех нагрузок к одной обмотке, величины коэффициентов $K_{пер}$ и K_U превысили значения 2,5 и 20 %.

Таким образом, разделение линейной и нелинейной нагрузок на разные секции шин, получающих питание от расщепленной вторичной обмотки трансформатора, улучшает оба показателя $K_{пер}$ и K_U, но не позволяет полностью решить проблемы как с токовой перегрузкой КБ высшими гармониками, так и с качеством напряжения на шинах линейной нагрузки.

Таблица 2

Результаты моделирования резонансных режимов

n	$Q^*_к$, %	$P^*_d \approx 0{,}1$		$P^*_d \approx 0{,}35$	
		K_U, %	$K_{пер}$, о.е.	K_U, %	$K_{пер}$, о.е.
5	22,5	5,5	1,1	12	1,26
7	10	6,7	1,15	12	1,67
11	4	6,9	1,38	10	1,55
13	2,8	9,6	1,8	12	1,66

В качестве примера моделирования на рис. 4, а, б, в приведены осциллограммы тока через КБ и напряжения на секции шин с линейной нагрузкой для некоторых режимов трансформатора мощностью 40 МВА.

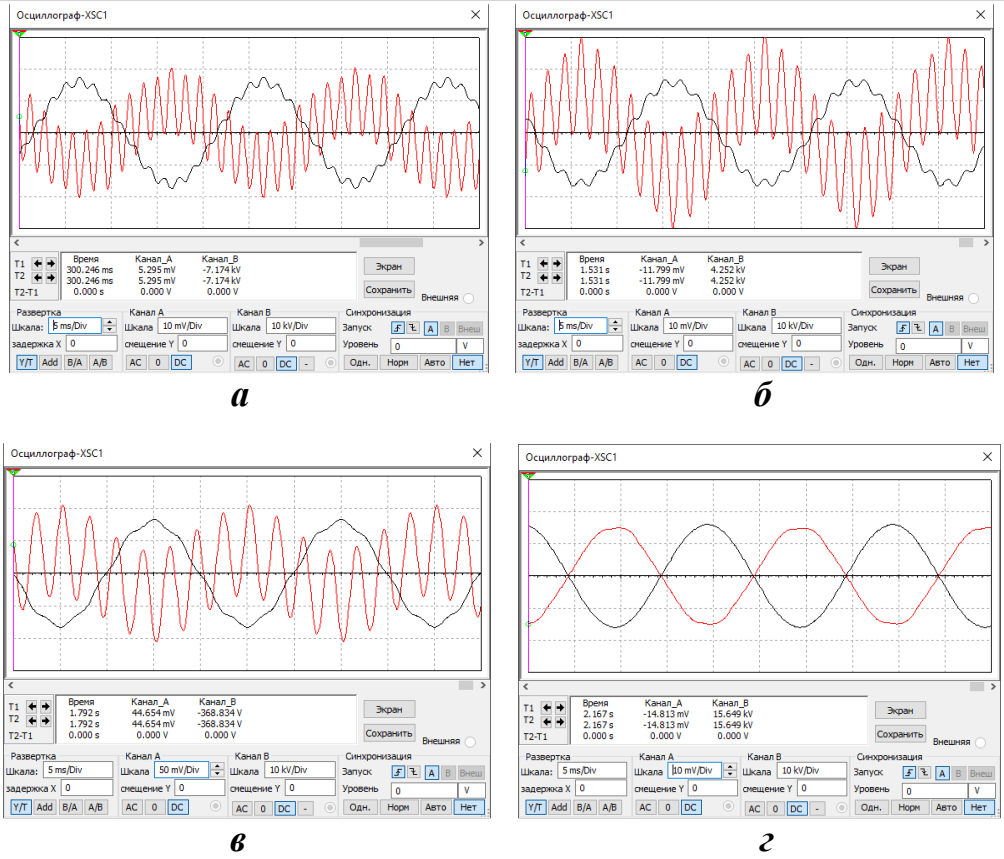


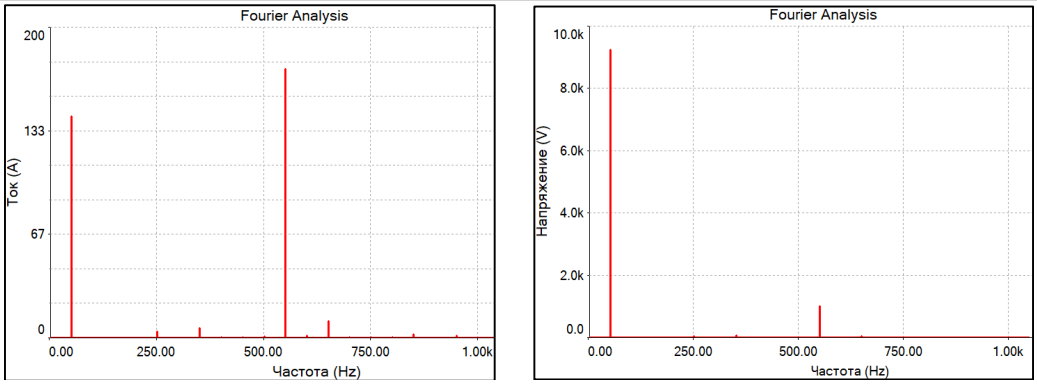
Рис. 4. Осциллограммы напряжения на секции шин с линейной нагрузкой и тока через КБ для трансформатора мощностью 40 МВА: а – P_d = 14 МВт, $P_н$ = 3 МВт, $Q_к$ = 1,15 Мвар (резонанс на 13-й гармонике); б – P_d = 14 МВт, $P_н$ = 6 МВт, $Q_к$ = 1,7 Мвар (резонанс на 11-й гармонике); в – P_d = 14 МВт, $P_н$ = 12 МВт, $Q_к$ = 4,5 Мвар (резонанс на 7-й гармонике); г – P_d = 14 МВт, $P_н$ = 6 МВт, $Q_к$ = 1,7 Мвар; $L_р$ = 14 мГ (р = 7 %)

Из этих осциллограмм отчетливо видно, что амплитуда резонирующей гармоники соизмерима и даже может превосходить амплитуду основной (первой) гармоники тока. Кроме того, в кривой линейного напряжения также хорошо видны гармонические составляющие.

На рис. 5 приведены результаты разложения в ряд Фурье кривых тока в КБ (а) и напряжения на секции с линейной нагрузкой (б) для режима, показанного на рис. 4, б. Видно, что ток резонирующей 11-й гармоники на 20 % превышает ток первой гармоники, а 11-я гармоника напряжения составляет около 10 % от первой гармоники.

Одним из методов подавления высших гармоник с СЭС является установка дополнительных индуктивностей (антирезонансных реакторов), которые изменяют общее сопротивление резонансного контура с индуктивно-емкостного до индуктивного характера [7].

Антирезонансные реакторы могут устанавливаться в различных точках СЭС, однако исходя из минимума мощности реакторов наиболее целесообразно их включение последовательно с конденсаторами. Такое размещение реакторов в цепи КБ рассмотрено ниже.



а ***б***

Рис. 5. Результаты разложения кривой тока в КБ (а) и напряжения на секции с линейной нагрузкой (б) в ряд Фурье

Принятые VDEW (Association of German Power Supply Companies) частоты расстройки колебательного контура составляют p = 14 или 7 %. Это означает, что сопротивление реактора в долях от сопротивления КБ на частоте 50 Гц составляет 14 % или 7 % [7]. Первый вариант применяется для защиты конденсаторов от всех гармоник, начиная с 3-й, второй – от всех гармоник, начиная с 5-й.

Поскольку при работе трехфазного мостового выпрямителя отсутствуют гармоники кратные трем (рис. 5), для дальнейшего моделирования был принят второй вариант с частотой расстройки p = 7 %.

В качестве примера моделирования на рис. 4, *г* приведены осциллограммы тока через КБ и напряжения на секции с линейной нагрузкой для трансформатора, загруженного линейной и нелинейной нагрузками так же, как на осциллограмме рис. 4, *б*. Индуктивность реактора $L_{\text{р}}$ = 14 мГ, что соответствует частоте расстройки p = 7 %.

Видно, что на осциллограмме рис. 4, г как в кривой тока, так и в кривой напряжения высшие гармоники визуально не наблюдаются. Токовая перегрузка КБ отсутствует, а напряжение на секции шин с линейной нагрузкой практически синусоидально ($K_U \le 1$ %).

При наличии в цепи КБ антирезонансных реакторов первая гармоника тока компенсации составит:

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{3}(X_{\text{к}} - X_{\text{р}})}; \tag{8}$$

реальная мощность конденсаторов:

$$Q_{\text{к}} = \sqrt{3}UI_1; \tag{9}$$

напряжение на конденсаторах:

$$U_{\text{к}} = \frac{U}{1 - X_{\text{р}} / X_{\text{к}}}. \tag{10}$$

Таким образом, при использовании антирезонансных реакторов напряжение на конденсаторах и выдаваемая реактивная мощность увеличатся в соответствии с принятой частотой расстройки на 7 %.

Заключение:

1. Выполнено компьютерное моделирование в среде *Multisim* режимов работы СЭС с нелинейной (выпрямительной) и линейной нагрузками и конденсаторной батареей. Нелинейная нагрузка выделена на отдельную секцию шин, подключенную к одной из обмоток низшего напряжения трансформаторов с расщепленной вторичной обмоткой. Рассмотрены режимы суточного изменения линейной нагрузки и соответствующего регулирования мощности конденсаторной батареи для типового ряда трансформаторов 110/10 кВ мощностью 25 … 80 МВА.

2. Показано, что выделение нелинейной и линейной нагрузок на разные секции шин трансформатора улучшает качество напряжения на секции с линейной нагрузкой и снижает токовую перегрузку конденсаторов, по сравнению со случаем подключения линейной и нелинейной нагрузок к одной секции шин.

3. Установлено, что при выделении нелинейной и линейной нагрузок на разные секции шин трансформатора с расщепленной обмоткой и суточном изменении мощности линейной нагрузки (и соответствующем регулировании мощности конденсаторной батареи в диапазоне 2,5 … 12 % от номинальной мощности трансформатора) в системе имеют место резонансные режимы на 13, 11 и 7 гармониках. В этих режимах несинусоидальность напряжения на секции шин с линейной нагрузкой может достигать 12 %, а токовая перегрузка конденсаторов 50 … 70 %.

4. Включение последовательно с конденсаторами антирезонансных реакторов с частотой расстройки p = 7 % полностью устраняет проблемы с токовой перегрузкой конденсаторов высшими гармониками и с качеством напряжения на секции с линейной нагрузкой.

Список литературы

1. Арриллага Д., Бредли Д., Боджер П.М. Гармоники в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.

2. Абрамович Б.Н., Устинов Д.А., Сычев Ю.А., Шклярский А.Я. Методы компенсации провалов и искажений напряжения в электрических сетях нефтедобывающих предприятий // Нефтяное хозяйство, 2014, Т. 8. С. 110-112.

3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2000. 6 с.

4. Костин В.Н. Электроэнергетические системы и сети: учебное пособие. СПб.: Троицкий мост, 2015. 304 с.

5. Костин В.Н., Сериков В.А. Компьютерное моделирование режимов работы систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 19–29.

6. Фишман В.С. Качество электроэнергии в руках проектировщика // Новости электротехники, №3(27), 2004. 6 с.

7. Шишкин С. Защитные антирезонансные дроссели низковольтных конденсаторных батарей // Силовая электроника. 2007. №4. 3 с.

8. Шклярский Я.Э., Скамьин А.Н. Способы уменьшения влияния высших гармоник на работу электрооборудования // Записки Горного института, 2011. Т. 189. С. 121-124.

9. Шклярский Я.Э., Скамьин А.Н. Проблемы высших гармоник в сетях промышленных предприятий // Електротехніка і електромеханіка. 2013. № 1. С. 69-71.

10. Abramovich B.N., Sychev Yu.A. Problems of ensuring energy security for enterprises from the mineral resources sector // Journal of Mininig Institute. 2016. № 217. P. 132-139.

11. Kostin V.N., Serikov V.A., Sherstennikova I.A. Higher harmonics and limiting thereof in power supply systems of different voltages // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. V.378. P. 012051.

12. Skamyin A.N., Baburin S.V. Algorithm for Selecting Cross-Capacitive Compensation Device Parameters with High Harmonics // Accounted For. International Journal of Applied Engineering Research. 2017. №12 (6). P. 1049-1053.

13. Skamyin A.N., Belsky A.A. Reactive power compensation considering high harmonics generation from internal and external nonlinear load // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. №87(3). P. 032-043.

Костин Владимир Николаевич, канд. техн. наук, доцент, kostin_vn@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет,

Кривенко Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент, krivenko_av@pers.spmi.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет,

Сериков Владимир Александрович, аспирант, serikov.va@bk.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет

INFLUENCE OF HIGH HARMONICS ON THE QUALITY OF VOLTAGE AND ON THE OPERATION OF CAPACITOR BANKS IN ELECTRIC SUPPLY SYSTEMS WITH NON-LINEAR LOAD

V.N. Kostin, V.A. Serikov, A.V. Krivenko

Based on computer simulation, the analysis of the modes of operation of power supply systems with non-linear and linear loads. The modes of daily variation of the linear load and the corresponding regulation of the capacitor bank power for a standard range of 110/10 kV transformers with a power of 25 ... 80 MVA are considered. It was found that the allocation of a non-linear load to a separate bus section is insufficient to provide the required quality of voltage on the linear load tires and the permissible load of the capacitor bank with higher harmonics currents. It is shown that the inclusion of antiresonance reactors in series with capacitors with a detuning frequency of p = 7% completely eliminates the problems with current overloading of capacitors by higher harmonics and with the quality of voltage across sections with linear load.

Key words: power supply system, simulation, voltage quality, capacitor bank, higher harmonics, resonant choke.

Kostin Vladimir Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, kostin_vn@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University,

Krivenko Aleksandr Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, krivenko_av@pers.spmi.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University,

Serikov Vladimir Aleksandrovich, postgraduate, serikov.va@bk.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University

УДК 621.355.29

ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ВБЛИЗИ ЭЛЕКТРОДОВ СВИНЦОВО-КИСЛОТНОГО АККУМУЛЯТОРА ПРИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЕГО ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ

А.А. Постников

Разработана физико-математическая модель изменения разности концентрационных потенциалов вблизи электродов свинцово-кислотных аккумуляторов с различной степенью заряженности, дополнительно учитывающая плотность электролита, полную площадь активной поверхности пористых электродов, их количество и габаритные размеры.

Ключевые слова: техническое состояние, степень заряженности, внутреннее сопротивление, полная площадь активной поверхности, электрод.

В системах электропитания различных электротехнических устройств широкое применение находят свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. Аккумуляторы в батарею соединяются последовательно и (или) параллельно. Зарядовая емкость аккумулятора коррелирует с его внутренним сопротивлением. Различают методы определения внутреннего сопротивления на постоянном и переменном токе, однако переменный ток более предпочтителен, так как в таком случае не изменяется состояние аккумулятора [1]. В зависимости от остаточной емкости аккумулятора, значение величины внутреннего сопротивления более всего меняется при воздействии переменного тока в области низких частот [2]. Протекание периодического тока между электродами аккумулятора вызывает периодическое уменьшение и увеличение концентрации потенциалопределяющих ионов, поэтому при расчете внутреннего сопротивления необходимо учитывать разность концентрационных потенциалов. Целью данной статьи является разработка физико-математической модели изменения концентрационных потенциалов свинцово-кислотных аккумуляторов с различной степенью заряженности при поляризации их переменным током.

Токообразующие реакции протекают на поверхности электродов. Изменения концентрации ионов подчиняются законам диффузии. Известно, что процесс диффузии описывается вторым законом А. Фика, который справедлив и в случае поляризации электрода переменным током [3].

Пусть рассматриваемый электрод является плоским и находится в бесконечности, то есть влияние другого электрода не учитывается, а концентрация ионов электролита $c = c(x,t)$, моль $\cdot$ м$^{-3}$, изменяется одинаково во всех точках. Ставится задача об отыскании решения уравнения диффузии, удовлетворяющего граничным условиям того или иного типа в каждый момент времени, при условии, что градиент концентрации направлен строго перпендикулярно поверхности электрода

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = D\frac{\partial^2 c(x,t)}{\partial x^2}, \tag{1}$$

где x – расстояние от поверхности электрода, м; t – время, прошедшее с начального момента процесса, с; D – коэффициент диффузии, м^2/с.

Если предположить, что количество электричества, которое идет на заряжание двойного слоя на поверхности электрода, мало по сравнению с количеством, которое тратится на изменение концентрации ионов, то в каждый момент времени общая величина зарядов, подходящих к электроду путем диффузии, равна количеству зарядов, принимающих участие в электрохимической реакции. Величина потока диффузии равна плотности электрического тока $i(t)$, А/м^2, проходящего через электрод [3]

$$i(t) = nFD\left.\frac{\partial c(x,t)}{\partial x}\right|_{x=0}, \tag{2}$$

где n – валентность; $F = 96485$ Кл/моль – число Фарадея.

Синусоидальный переменный ток изменяется во времени по закону

$$i(t) = i_0 \cdot \sin \omega t = i_0 \cdot \sin 2\pi ft, \tag{3}$$

где i_0 – амплитуда переменного тока, А; ω – циклическая частота переменного тока, рад/с; f – частота переменного тока, Гц.

Формулы (2) и (3) приводят к граничному условию в виде

$$nFD\left.\frac{\partial c(x,t)}{\partial x}\right|_{x=0} = i_0 \cdot \sin \omega t. \tag{4}$$

Считая, что на большом расстоянии от поверхности электрода концентрация не меняется и остается равной первоначальной концентрации c_0, моль $\cdot$ м$^{-3}$, получено условие на бесконечности

$$c(x,t) \xrightarrow{x \to +\infty} c_0. \tag{5}$$

Тем самым, возникла краевая задача на полубесконечной прямой. Необходимо найти ограниченное решение уравнения диффузии (1) в области $x > 0$, удовлетворяющее краевому условию второго рода (4) и условию на бесконечности (5)

$$\lim_{x \to +\infty} c(x,t) = c_0.$$

Решение уравнения (1) известно из исследования [4]. При граничных условиях (4), (5) оно имеет вид

$$c(x,t) = c_0 + \frac{i_0}{nF\sqrt{D\omega}} \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2D}}x\right) \sin\left(\sqrt{\frac{\omega}{2D}}x - \omega t + \frac{\pi}{4}\right). \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что прохождение переменного тока через электрод вызывает колебания концентрации той же частоты, что и частота тока. Колебания распространяются от поверхности электрода вглубь раствора с амплитудой пропорциональной величине $\exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2D}}x\right)$.

Согласно уравнению В. Нернста, разность концентрационных потенциалов электрода $\Delta\varphi$, В, изменяется по закону [5]

$$\Delta\varphi = \frac{RT}{nF} \ln\frac{c}{c_0} = \frac{RT}{nF} \ln\left(1 + \frac{c - c_0}{c_0}\right), \quad (7)$$

где $R = 8{,}314$ Дж·моль·К$^{-1}$ − газовая постоянная; T – температура электролита, К.

При незначительном изменении потенциала электрода, $\Delta\varphi < RT / nF$, величина $(c - c_0)/c_0$ мала по сравнению с единицей, тогда $\ln[1 + (c - c_0)/c_0]$ с достаточным приближением можно заменить на $(c - c_0)/c_0$ [3], поэтому выражение (7) примет вид

$$\Delta\varphi = \frac{RT}{nF}\left(\frac{c - c_0}{c_0}\right). \quad (8)$$

Из формулы (6) $c - c_0$ при $x = 0$

$$c - c_0 = \frac{i_0}{nF\sqrt{D\omega}} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \omega t\right). \quad (9)$$

С учетом (9) формула (8), после преобразования, примет вид

$$\Delta\varphi = i_0 \frac{RT}{n^2F^2c_0\sqrt{D\omega}} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \omega t\right). \quad (10)$$

С целью удобства выполнения дальнейших расчетов необходимо выполнить переход к силе тока *I*, А, пропускаемой через батарею. Для этого необходимо знать площадь активной поверхности электрода. В работе [6] приводится модель изменения полной площади активной поверхности полублока электродов аккумулятора $S_{эл}$, м^2

$$S_{эл} = \frac{\pi \cdot k \cdot l \cdot h \cdot b}{d}, \quad (11)$$

где k − количество электродов в полублоке аккумулятора, шт; l, h, b − длина, высота, толщина электрода соответственно, м; d − диаметр пор, м.

С учетом (11) формула (10) примет вид

$$\Delta\varphi = \frac{I \cdot d}{\pi \cdot l \cdot h \cdot b \cdot k} \cdot \frac{RT}{n^2F^2c_0\sqrt{\omega D}} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \omega t\right). \quad (12)$$

В практических целях гораздо удобнее в расчетах использовать массовую долю c_m, %, а не молярную концентрацию c_0. Из исследования [7] известно соотношение между c_m и c_0

$$c_0 = \frac{\rho \cdot c_m}{100 M_{H_2SO_4}}, \qquad (13)$$

где ρ – плотность электролита, кг/м^3; $M_{H_2SO_4} = 0{,}098$ кг/моль – молярная масса серной кислоты.

Тогда, с учетом (13), формулу (12) можно записать в виде

$$\Delta\varphi = \frac{I \cdot d}{\pi \cdot l \cdot h \cdot b \cdot k} \cdot \frac{9{,}8}{\rho \cdot c_m} \cdot \frac{RT}{n^2 F^2 \sqrt{2\pi fD}} \sin\left(\frac{\pi}{4} - 2\pi ft\right). \qquad (14)$$

Таким образом, из выражения (14) следует, что разность концентрационных потенциалов изменяется тем быстрее, чем выше амплитуда переменного тока и ниже начальная концентрация электролита. Переменный ток, протекающий через батарею, опережает разность концентрационных потенциалов на величину $\pi/4$. Полученное выражение позволяет рассчитать разность концентрационных потенциалов вблизи электродов в зависимости от диаметра пор, длины, высоты, ширины, площади активной поверхности электродов и частоты воздействующего переменного тока. Так как в формулу (14) включена плотность электролита, то становится возможным в расчетах учесть и степень заряженности аккумуляторов.

Прохождение переменного тока в свинцово-кислотном аккумуляторе вызывает не только сдвиг потенциалов электрода, обусловленный концентрационной поляризацией, но и изменение потенциала в приэлектродном слое электролита. Это обстоятельство позволяет рассчитать по закону Ома величину омического падения потенциала, что может быть использовано при практической оценке технического состояния свинцово-кислотных батарей с различной степенью заряженности.

Список литературы

1. Вайлов А.М., Эйгель Ф.И. Автоматизация контроля и обслуживания аккумуляторных батарей. М.: Связь, 1985. 156 с.

2. Таганова А.А. Диагностика герметичных химических источников тока. СПб.: Химиздат, 2007. 128 с.

3. Фрумкин А.Н., Багоцкий В.С., Иофа З.А., Кабанов Б.Н. Кинетика электродных процессов. М.: Издательство Московского университета, 1952. 320 с.

4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. 736 с.

5. Ньюмен Дж. Электрохимические системы. М.: Мир, 1977. 464 с.

6. Постников А.А. Теоретическая модель площади активной поверхности электродов свинцовых аккумуляторов // Научный резерв. 2019. № 4. С. 57–62.

7. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии: справочное издание. М.: Химия, 1989. 448 с.

Постников Александр Александрович, начальник учебной лаборатории, aapostnikov@mail.ru, Россия, Рязань, Рязанское гвардейское высшее воздушно-десантное командное училище

CHANGES IN CONCENTRATION POTENTIALS NEAR LEAD-ACID BATTERY ELECTRODES WHEN IT IS POLARIZED BY ALTERNATING CURRENT

A.A. Postnikov

A physical and mathematical model of the change in the concentration potential difference near the electrodes of lead-acid batteries with different levels of charge has been developed, which additionally takes into account the density of the electrolyte, the total active surface area of the porous electrodes, their number and overall dimensions.

Key words: technical condition, degree of charge, internal resistance, total active surface area, electrode.

Postnikov Alexander Alexandrovich, head of the training laboratory, aapostnikov@mail.ru, Russia, Ryazan, Ryazan guards higher airborne command school

УДК 519.873

СТРУКТУРА ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ПОИСКА КРАТЧАЙШЕГО ПУТИ

А.И. Смирнов, Я.Э. Шклярский

В статье распределительная электросеть моделируется в соответствии с теорией графов, где компоненты представлены в виде узлов и с помощью алгоритма для поиска кратчайшего пути, определяется иерархия реле в любой момент времени независимо от динамических изменений, происходящий в системе.

Ключевые слова: распределительные сети, теория графов, алгоритм дейкстры, распределенная генерация, релейная защита.

Распределенная генерация позволяет производить электроэнергию вблизи её потребления и устраняет необходимость в линиях передачи и связанные с ними потери. Когда местные электростанции подключены к распределительным сетям, характеристики системы меняются и возникают ключевые технические проблемы, которые ранее были неизвестны [1-2]. Традиционные методы селективности предполагают фиксированную структуру сети и заранее определенную последовательность работы токовой защиты, что не соответствует новым концепциям динамических микросетей [3]. Для правильной работы иерархия релейной защиты и установка соответствующих временных отсечек должны обновляться при изменениях структуры сети. [4, 5]. Для этого требуется алгоритм, который определит текущую структуру системы и определит последовательность ее элементов.

Существующие алгоритмы предполагают наличие справочных таблиц [6] и [7], что требует знания всех возможных конфигураций сетей, а также участия человека при подготовке этой таблицы. Более того, любое расширение сети и добавление в нее новых элементов требует составления новых таблиц селективности релейной защиты.

В данной статье предлагается использовать метод, который моделирует распределительную сеть в соответствии с теорией графов и реализует алгоритм Дейкстры [8] для реализации селективной работы релейной защиты.

1. Селективность релейной защиты в условиях динамической структуры сети. В традиционных системах защиты, разработанных для пассивных сетей, устройства токовой защиты, которые находятся ближе к месту повреждения, должны работать в первую очередь. Последующий участок осуществляет в этом случае резервную защиты поврежденного участка.

Рассмотрим систему, показанную на рис. 1. В этой сети все ветви имеют местную генерацию электроэнергии или нагрузку и с помощью выключателей могут быть сформированы различные комбинации сетевых структур.

В первом случае предположим, что автоматические выключатели S1, S2, S3, S4, S6 и S7 замкнуты, а S5 разомкнут. При возникновении повреждения у нагрузки должно сработать ближайшее к ней устройство защиты. Если ближайшее реле не осуществило отключение участка, тогда через определенное время срабатывает резервная защита.

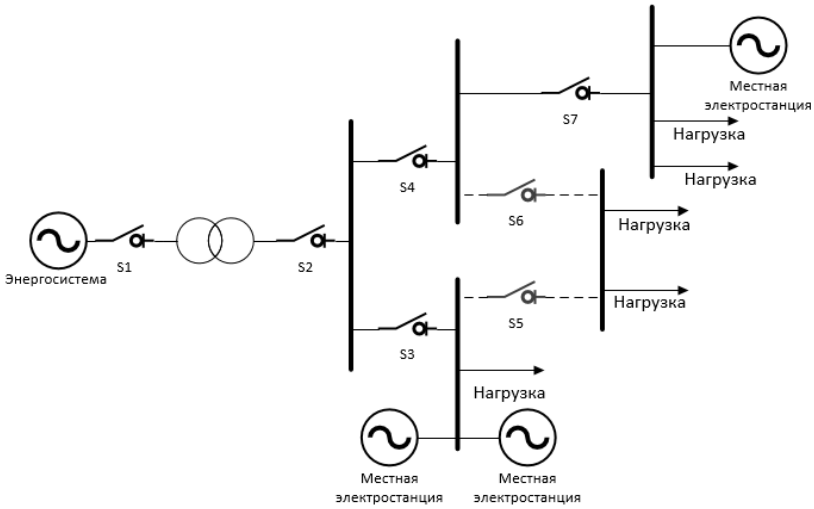


Рис. 1. Пример распределенной сети

Если S4 отключен по какой-либо причине, например, из-за технического обслуживания или повреждения, для сохранения целостности сети включается S5, изменяя структуру распределительной сети. Теперь существует только одна ветвь для потока мощности вместо двух. Во втором случае для этой новой топологии сети все временные задержки должны быть пересчитаны в соответствии с новыми условиями.

После определения структуры распределительной сети и ее релейной иерархии несложно определить подходящие временные задержки. Пусть t_{max} будет максимальной продолжительностью времени до устранения неисправности в системе. Это значение делится на количество селективных уровней n в иерархии реле и базовая временная задержка определяется (1).

$$t = \frac{t_{\max}}{n}. \quad (1)$$

Временная задержка для каждого реле t_C рассчитывается путем умножения этой базовой временной задержки на селективный уровень S_r данного конкретного реле.

$$t_C = \frac{t_{\max}}{n} \times S_r. \quad (2)$$

Принимая во внимание, что обновление параметров релейной защиты осуществляется по дополнительным линиям связи из центрального блока, необходимо дополнительно учитывать временную задержку из-за линий связи t_d, если это требуется для обновления параметров в реальном времени. Окончательная время задержки t_E, которое учитывает линию связи, рассчитывается:

$$t_E = t_C - t_d. \quad (3)$$

2. Алгоритм поиска кратчайшего пути для определения иерархии релейной защиты. Алгоритм Дейкстры - это алгоритм поиска графа, который решает проблему кратчайшего пути из одного источника во многие пункты назначения [8]. Для реализации алгоритма необходимо представить распределительную сеть в виде графа. Автоматические выключатели, источники местной генерации электроэнергии и нагрузка должны быть представлены в виде вершин, а их соединения в виде ребер графа и хранить эту структуру в массиве данных, что требует хранения структуры данных в массиве.

Когда топология электросети изменяется, отключается какая-либо линия или подключается альтернативная необходимо обновление массива данных в реальном времени, что требует постоянного мониторинга использования линий связи между узлами.

Рис. 2, 3 показывают графическое представление двух случаев, описанных выше. Для обеспечения селективности конечной целью является определение последовательности отключения токовой защиты в этой системе. На рисунках ребра графа отмечены единичными расстояниями, которые обозначают количество селективных уровней *n*. Базовая временная задержка рассчитывается путем замены расстояния *n* в (1) и (2). Если необходимо установить временную задержку для конечных узлов, тогда заменяется значение «*n+1*».

Когда алгоритм запускается для смоделированных ситуаций, описанных выше, будут получены кратчайшие пути и расстояния, указанные в табл. 1 и 2. При изменении структуры распределительной сети из-за от-

ключения линий электропередач, появления новых нагрузок или источников местной генерации электроэнергии, знание пункта отправления и назначения достаточно для организации новой стратегии селективной работы электросети. Каждый конечный узел представляющий из себя нагрузку должен помечаться специальным заголовком или меткой для того, алгоритм мог построить маршруты от известного источника до конечных пунктов в любой сетевой структуре. Кроме того, в случае добавления новых элементов сети, они будут автоматически учтены в процессе расчета маршрутов при условии, что данные вершин и ребер будут соответствующим образом обновлены.

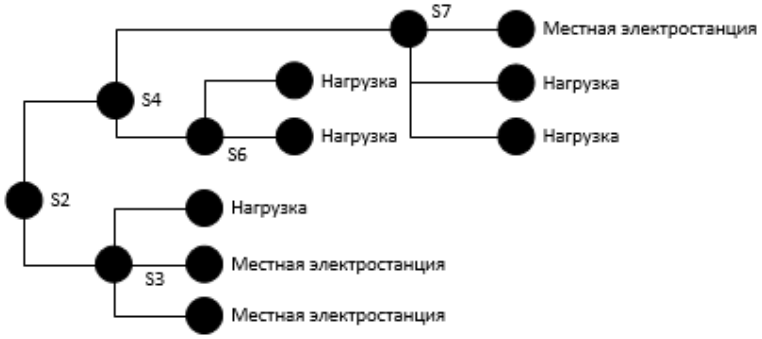


Рис. 2. Моделирование графа электросети для первого случая

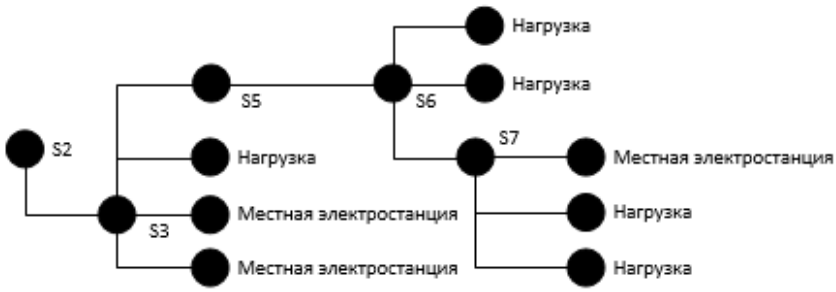


Рис. 3. Моделирование графа электросети для второго случая

Таблица 1

Результат работы алгоритма Дейкстры и настройки релейной защиты для первого случая

№ п/п	n	Маршрут	t	t_C	t_a
1		S2	-	800	720
2	1	S2-S3	800/3	1600/3	1360/3
3	1	S2-S4	200	600	520
4	2	S2-S3-МЭС*	800/3	800/3	560/3
5	2	S2-S3-МЭС*	800/3	800/3	560/3
6	2	S2-S3-Нагрузка*	800/3	800/3	560/3
7	-	-	-	-	-
8	2	S2-S4-S6	200	400	320
9	2	S2-S4-S7	200	400	320
10	3	S2-S4-S6-Нагрузка*	200	200	120
11	3	S2-S4-S6-Нагрузка*	200	200	120
12	3	S2-S4-S7-МЭС*	200	200	120
13	3	S2-S4-S7-Нагрузка*	200	200	120
14	3	S2-S4-S7-Нагрузка*	200	200	120

Таблица 2

Результат работы алгоритма Дейкстры и настройки релейной защиты для второго случая

№ п/п	n	Маршрут	t	t_C	t_a
1		S2	-	800	720
2	1	S2-S3	400/3	2000/3	1760/3
3	-	-	-	-	-
4	2	S2-S3-МЭС*	400/3	400/3	160/3
5	2	S2-S3-МЭС*	400/3	400/3	160/3
6	2	S2-S3-Нагрузка*	400/3	400/3	160/3
7	2	S2-S3-S5	400/3	1600/3	1360/3
8	3	S2-S3-S5-S6	400/3	1200/3	960/3
9	4	S2-S3-S5-S6-S7	400/3	800/3	560/3
10	4	S2-S3-S5-S6-Нагрузка*	400/3	400/3	400/3
11	4	S2-S3-S5-S6-Нагрузка*	400/3	400/3	400/3
12	5	S2-S3-S5-S6- S7-МЭС*	400/3	400/3	160/3
13	5	S2-S3-S5-S6-S7-Нагрузка*	400/3	400/3	160/3
14	5	S2-S3-S5-S6-S7-Нагрузка*	400/3	400/3	160/3

Для расчета соответствующих временных задержек в (1), (2) и (3) для обоих случаев используются полученные данные алгоритма. Максимальное время, разрешенное до устранения повреждения, т. е. t_{max} устанавливается 800 мс для обеспечения стабильности сети, при моделировании линий связи используется задержка передачи данных 80 мс. Для реализации временной задержи на конечных узлах используется подход «*n+1*», описанный выше. В результате конфигурации реле, полученные для обоих случаев, представлены в табл. 2 и 3.

Заключение. Распределительных сети, в которых возможно питание через альтернативные линии, изменение структуры, развертывание новых подстанций и других факторов, препятствующих селективной работе токовой защиты, требуют обновления параметров реле параллельно с существующей структурой сети. Некоторые из предыдущих публикаций включают справочные таблицы с предопределенными данными о структуре сети. Этот подход не может реагировать на динамическое изменение структуры сети. Таким образом, в этой статье был представлен метод, основанный на теории графов для определения иерархии релейной защиты и назначения уровней селективности, где реле представлены в виде вершин, а соединения представлены в виде ребер. Чтобы найти путь от точки общей связи до реле на самом низком уровне, используется алгоритм Дейкстры, который извлекает все возможные пути для любой структуры электросети.

Список литературы

1. Basso T.S., DeBlasio R. IEEE 1547 series of standards: interconnection issues // Power Electronics, IEEE Transactions on, 2004. Vol. 19. P. 1159-1162.

2. Driesen J., Vermeyen P., Belmans R. Protection Issues in Microgrids with Multiple Distributed Generation Units // In Power Conversion Conference - Nagoya, 2007. P CC '07, 2007. P. 646-653.

3. Conti S., Raffa L., Vagliasindi U. Analysis of protection issues in autonomous MV micro-grids // In Electricity Distribution, 2009. Part 1. CIRED 2009. 20th International Conference and Exhibition on, 2009. P. 15.

4. Kroposki B., Basso T., DeBlasio R. Microgrid standards and technologies // in Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, 2008. P. 1-4.

5. Kroposki B., Lasseter R., Ise T., Morozumi S., Papathanassiou St., Hatziargyriou N. Making microgrids work // Power and Energy Magazine, IEEE, 2008ю Vol. 6. P. 40-53.

6. El-Tamaly H.H., El-sayed A.H.M. A new technique for setting calculation of digital distance relays // In Power Systems Conference. MEPCON 2006. Eleventh International Middle East, 2006. P. 135-139.

7. Ahmed OsmanTamer, Abdelazim MellikTamer, Abdelazim Mellik. Transmission line distance relaying using on-line trained neural networks // Power Delivery. IEEE Transactions on, 2005. Vol. 20. P. 1257-1264.

8. Best J., Morrow D.J., Crossley P.A. Communication assisted protection selectivity for reconfigurable and islanded power networks // In UPEC. Proceedings of the 44th International, 2009. P. 1-5.

9. DongKai F., Ping S. Improvement of Dijkstra's algorithm and its application in route planning // In Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD). Seventh International Conference on, 2010. P. 1901-1904.

Смирнов Артем Иванович, аспирант, smiartem@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный университет,

Шклярский Ярослав Элиевич, д-р техн. наук, доцент, js-10@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный университет

DISTRIBUTED GRID'S CURRENT PROTECTION STRUCTURE BASED ON THE SHORTEST PATH SEARCH ALGORITHM

A.I. Smirnov, Y.E. Shklyarskiy

In the article, the distribution power network is modeled in accordance with the theory of graphs, where the components are presented in the form of nodes and using the algorithm to find the shortest path, the relay hierarchy is determined at any time, regardless of dynamic changes that occur in the system.

Key words: distributed grid, graph theory, dijkstra algorithm, distributed generation, relay protection.

Smirnov Artem Ivanovich, postgraduate, smiartem@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University,

Shklyarskiy Yaroslav Elievich, doctor of technical sciences, docent, js-10@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University

ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.983; 539.374

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ВЫДАВЛИВАНИИ

С.Н. Ларин, А.А. Пасынков, М.В. Ларина

В статье представлены результаты исследований влияния рабочей геометрии деформирующего пуансона на изменение напряжений и деформаций по площади изделия. Предполагается использование пуансона со скошенной кромкой. Оценивается влияние угла скоса кромки и величины редукции на средние нормальные напряжения. Исследование выполнялось на базе метода конечных элементов.

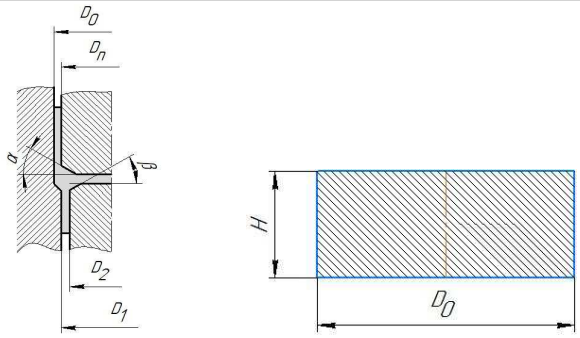
Ключевые слова: комбинированное выдавливание, пуансон, матрица, напряжения, деформации.

При реализации процессов выдавливания на протекание процесса и основные его характеристики большое влияние оказывает форма деформирующего инструмента. В связи с этим в работе выполнено исследование влияния размеров и формы инструмента с конической рабочей частью на напряжённо-деформированное состояние. Исследование выполнялось в программе DEFORM.

На рис. 1, а представлена схема процесса. На рис 1, б представлен эскиз заготовки.

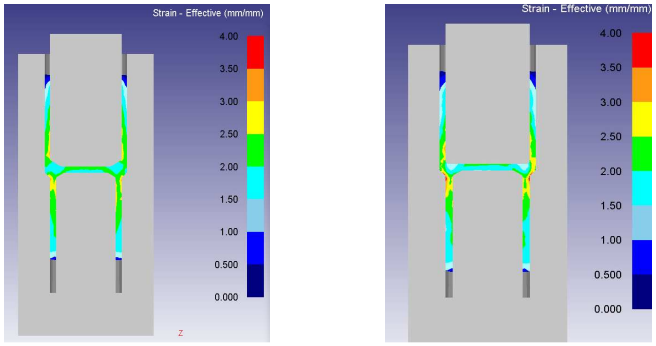
Размеры заготовки: высота $H = 25$ мм; $D_0 = 80$ мм. В качестве материала заготовки исследовалась сталь 45. Диаметр матрицы принимался равным $D_0 = 80$ мм. Диаметр отверстия матрицы принимался $D_1 = 70$ мм. Диаметр деформирующего пуансона $D_n = 70...74$ мм. Диаметр нижнего пуансона изменялся в диапазоне $D_2 = 60...64$ мм. Углы фасок пуансонов менялись в интервале $30...90°$.

Установлено влияние углов α и β на величины интенсивностей деформаций в выдавливаемом изделии. На рис. 2 представлены полученные расчетные схемы со шкалами деформаций при различны углах конусности.



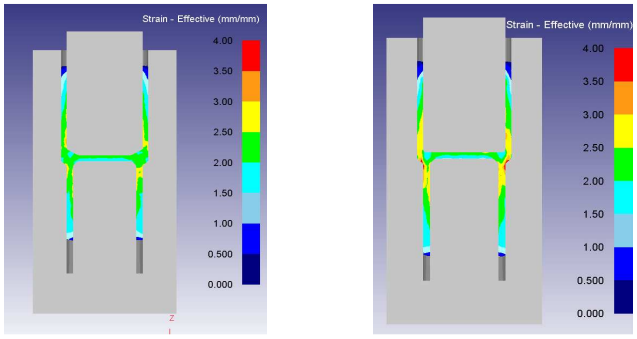
а *б*

Рис. 1. Схема процесса выдавливания (а) и эскиз заготовки (б)



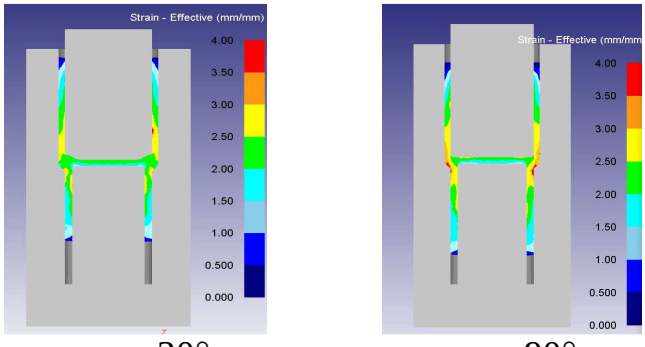
$\alpha = 30°$ $\alpha = 90°$

а



$\alpha = 30°$ $\alpha = 90°$

б



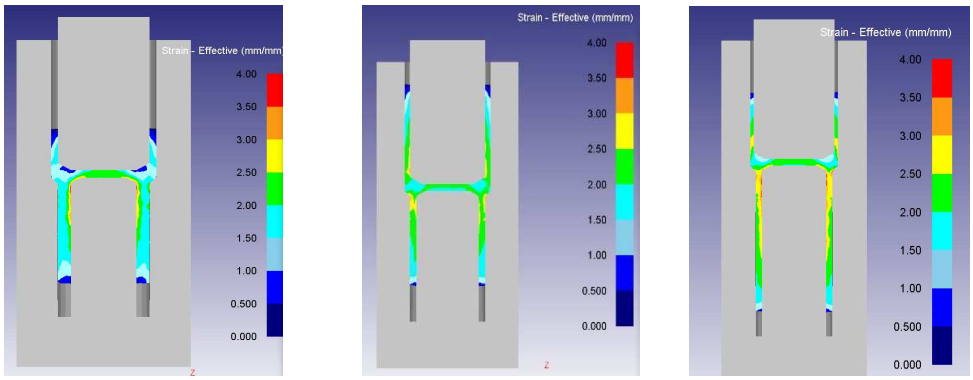
$\alpha = 30°$ $\alpha = 90°$

в

Рис. 2. Эскизы к оценке интенсивностей деформаций в детали:
($D_0 = 80$ ***мм,*** $D_n = 70$ ***мм,*** $D_1 = 70$ ***мм,*** $D_2 = 64$***мм)***
а - $\beta = 30°$***; б -*** $\beta = 45°$***; в -*** $\beta = 90°$

Из рис. 2 видно, что как увеличение угла скоса верхнего пуансона, так и нижнего пуансона приводит к росту интенсивностей деформаций. Деформации растут не по все площади детали, а локально. Но здесь так же заметно их разное влияние. Увеличение углов скоса нижнего деформирующего инструмента приводит к росту деформаций при выходе из очага деформации в верхней выдавливаемой стенке на границе с пуансоном. Степень их роста составляет в этом случае более 20%. Увеличение угла скоса верхнего пуансона приводит к большему росту деформаций. Их величины растут более чем на 30%. Наибольшие деформации при изменении угла α наблюдаются на границе с коническим участком матрицы.

На рис. 3 представлены схемы, позволяющие установить влияние изменение диаметров деформирующих пуансонов на величины деформаций.



а ***б*** ***в***

Рис. 3. Эскизы к оценке интенсивностей деформаций в детали
($D_0 = 80$ ***мм,*** $D_1 = 70$ ***мм,*** $\alpha = 30°$, $\beta = 30°$***):***
а - $D_n = 70$ ***мм,*** $D_2 = 60$***мм; б -*** $D_n = 70$ ***мм,*** $D_2 = 64$***мм;***
в - $D_n = 74$ ***мм,*** $D_2 = 64$***мм***

Анализ полученных данных позволяет сделать выводы о том, что изменение относительных диаметров деформирующих инструментов D_n / D_0 и D_2 / D_1 заметно влияет на величины деформаций при выдавливании. Но тут стоит отметить, что в случае улучшений условий истечения в нижнюю полость при неизменных или затрудненных условиях течения в верхнюю заметен рост деформаций, образующихся в изделии на границе с нижним пуансоном. Обеспечение таких условий, когда течение металла происходит равномерно в верхнюю и нижнюю полости позволяет улучшить деформируемое состояние изделия.

На рис. 4 даны схемы, позволяющие проанализировать влияние углов α и β на средние нормальные напряжения в изделии.

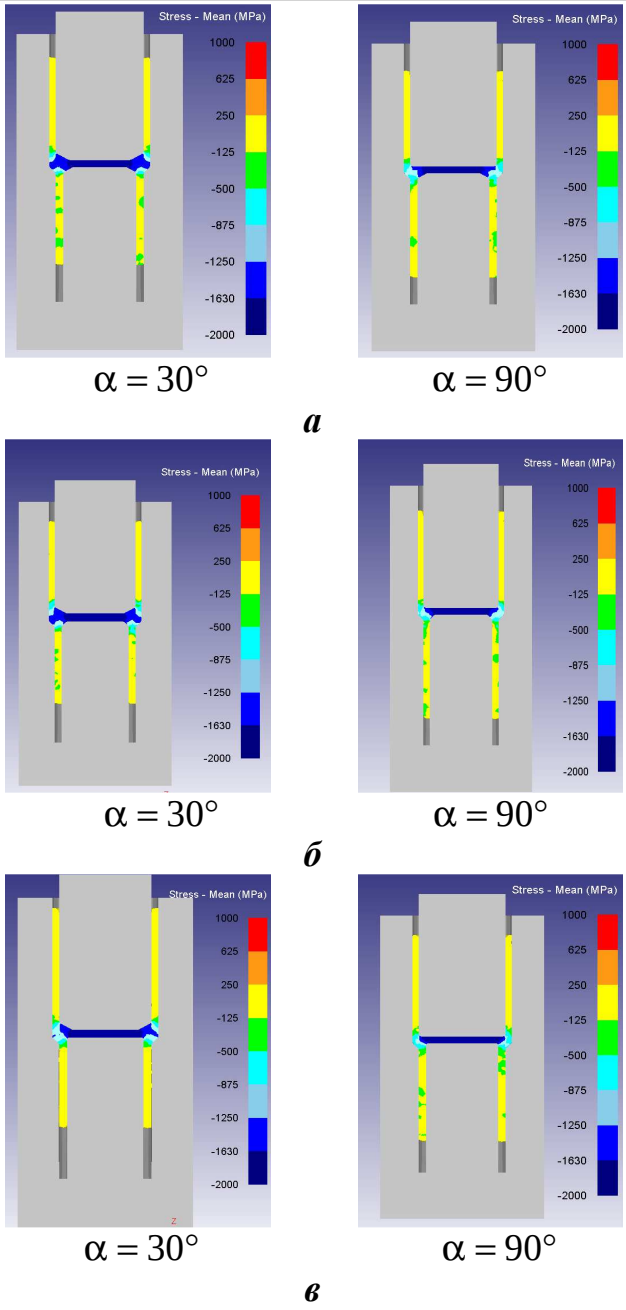
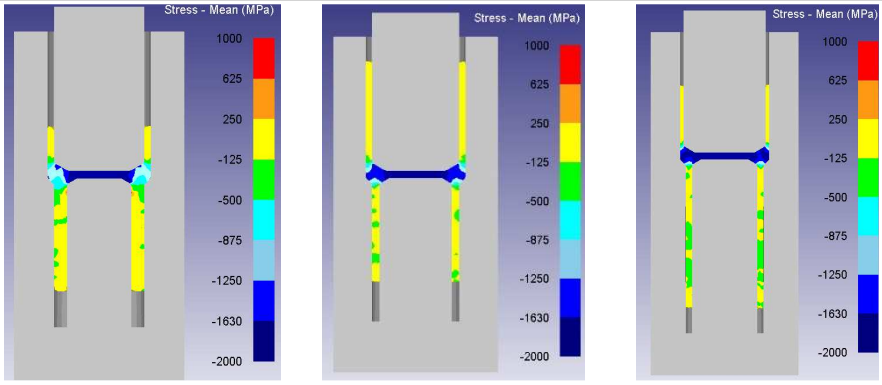


Рис. 4. Эскизы к оценке средних нормальных напряжений в изделии ***(*** $D_0 = 80$ ***мм,*** $D_n = 70$ ***мм,*** $D_1 = 70$ ***мм,*** $D_2 = 64$***мм):***
а - $\beta = 30°$***; б*** - $\beta = 45°$***; в*** - $\beta = 90°$

Анализ данных, представленных на рис. 4 позволил установить, что изменение углов конусности инструмента так же оказывает влияние на напряжения в изделии. В основном напряжения при выдавливании при разных значениях изменяемых углов изменяются рядом с очагом деформации. Изменяются площади действующих напряжений. Максимальные величины нормальных напряжений изменяются не сильно.

На рис. 5 даны схемы, позволяющие проанализировать влияние диаметров деформирующих пуансонов на средние нормальные напряжения в изделии.



а ***б*** ***в***

Рис. 5. Эскизы к оценке средних нормальных напряжений в изделии ***($D_0 = 80$ мм, $D_1 = 70$ мм, $\alpha = 30°$, $\beta = 30°$):***
а - $D_n = 70$ мм, $D_2 = 60$мм; б - $D_n = 70$ мм, $D_2 = 64$мм;
в - $D_n = 74$ мм, $D_2 = 64$мм

Анализ данных, приведенных выше позволяет сказать, что увеличение диаметров пуансонов при неизменном диаметре матрицы делает напряженное состояние в изделии более равномерным. Это можно объяснить значительными гидростатическими нагрузками. Из рис. 5, а видно, что увеличение толщины нижней стенки при неизменённой толщине верхней привело к формированию опасного участка в изделии на выходе из очага деформации в нижнюю стенку. Возникли значительные по величине растягивающие напряжения, которые могут привести к разрушению материала.

Вывод. Результаты исследований показали, что подбор углов конусности инструмента для определенных геометрических соотношений диаметров инструмента позволяет обеспечить улучшения напряженно-деформированного состояния в изделии при выдавливании.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 20-08-00401.

Список литературы

1. Яковлев С.П., Яковлев С.С., Андрейченко В.А. Обработка давлением анизотропных материалов. Кишинев: Квант, 1997. 332 с.

2. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1968. 283 с.

3. Чудин В.Н., Пасынков А.А. Нестационарные процессы изотермической штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением, 2018. №6. С. 23-28.

4. Пасынков А.А., Борискин О.И., Ларин С.Н. Теоретические исследования операции изотермической раздачи труб из труднодеформируемых цветных сплавов в условиях кратковременной ползучести // Цветные металлы. 2018. №2. С. 74-78.

5. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. М.: Металлургия, 1976. 488 с.

6. Демин В.А., Черняев А.В., Платонов В.И., Коротков В.А. Методика экспериментального определения механических и пластических свойств материала при растяжении с повышенной температурой // Цветные металлы. 2019. №5. С. 66-73.

Ларин Сергей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Платонов Валерий Иванович, канд. техн. наук, доцент, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ларина Марина Викторовна, канд. техн. наук, доцент, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

INFLUENCE OF GEOMETRY OF A DEFORMING TOOL ON A STRESSED-DEFORMED STATE IN COMBINED EXTRACTION

S.N. Larin, A.A. Pasynkov, M.V. Larina

The article presents the results of studies of the influence of the working geometry of the deforming punch on the change in stress and strain over the area of the product. The use of a punch with a beveled edge is intended. The influence of the bevel angle of the edge and the reduction value on the average normal stresses is estimated. The study was carried out on the basis of the finite element method.

Key words: combined extrusion, punch, matrix, stress, strain.

Larin Sergey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Platonov Valery Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Larina Marina Viktorovna, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.771

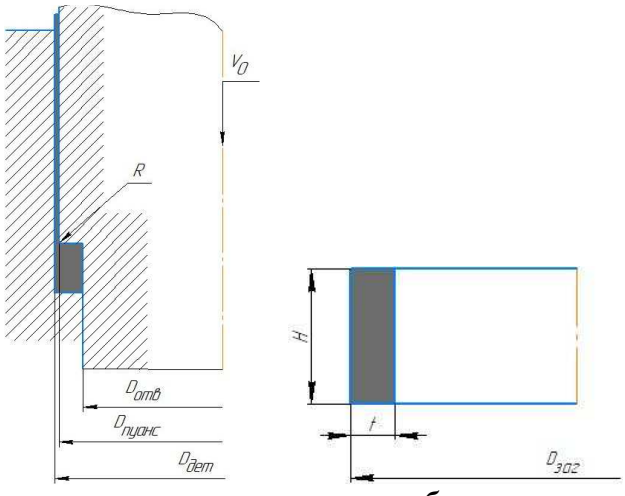
ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ КОРПУСНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ТОЛСТЫМ ДНОМ В ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ МАТРИЦУ

А.А. Пасынков, И.И. Матасов, Б.С. Яковлев

В статье приведены результаты исследований, основанных на моделировании процесса изотермического обратного выдавливания трудной заготовки из алюминиевого сплава. Предполагается что изделия имеют дно в несколько раз толщиной больше чем толщина стенки. Проанализировано изменение напряженно-деформированного состояния заготовки и силовые параметры.

Ключевые слова: обратное выдавливание, трубные заготовки, исследование анализ.

Рассмотрим операцию выдавливания трубной заготовки из сплава АМг4. Матрица имеет цилиндрическую форму рабочего отверстия с диаметром $D_м = D_{заг} = 100$ мм. Пуансон так же имеет цилиндрическую форму. Его рабочий диаметр $D_{пуанс}$ изменялся в ходе анализа в зависимости от толщины заготовки и требуемой толщины выступа. При анализе данной операции основным исследуемым фактором являлась величина относительного диаметра пуансона, равная $r = \left((D_{дет} - D_{отв})^2 - (D_{дет} - D_{пуанс})^2\right)/(D_{дет} - D_{отв})^2$. В качестве заготовки принималась труба с диаметром $D_{заг} = 100$ мм, высотой $H = 30$ мм и разной толщиной. На рис. 1 представлена схема рассматриваемого процесса выдавливания (а) и эскиз заготовки (б). Деформирование происходит в изотермических условиях. Температура заготовки составляет $450°C$.



а ***б***

Рис. 1. Схема выдавливания (а) и эскиз заготовки (б)

На рис. 2 представлены полученные в ходе моделирования схемы процесса, показывающие распределение средних нормальных напряжений в площади поперечного сечения детали.

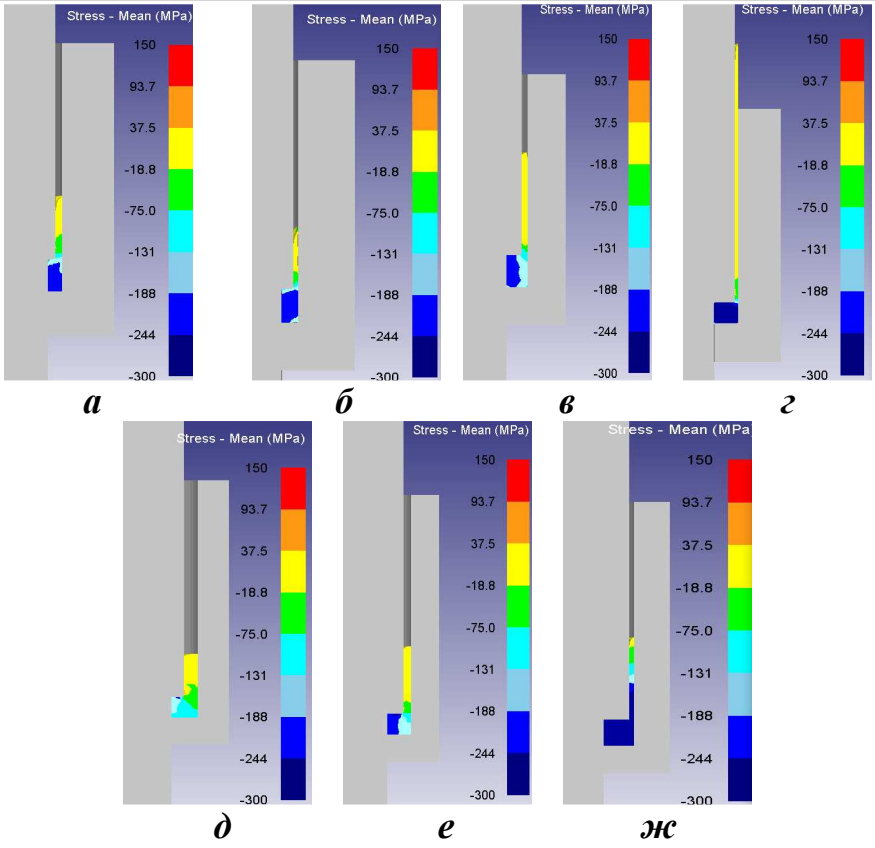


Рис. 2. К оценке средних нормальных напряжений в детали:
а - $t = 5$ ***мм,*** $r = 0{,}75$***; б*** - $t = 5$ ***мм,*** $r = 0{,}9$***; в*** - $t = 10$ ***мм,*** $r = 0{,}85$***;***
г - $t = 10$ ***мм,*** $r = 0{,}95$***; д*** - $t = 15$ ***мм,*** $r = 0{,}7$***; е*** - $t = 15$ ***мм,*** $r = 0{,}88$***;***
ж - $t = 15$ ***мм,*** $r = 0{,}98$

Представленные выше схемы позволяют оценить распределение напряжений в теле изделия. В целом из визуального анализа можно сказать, что рост величины редукции приводит к заметному росту сжимающих напряжений. Растягивающие напряжения во всех представленных случаях не сильно отличаются.

В ходе моделирования был проведен более точный анализ напряженного состояния изделия в процессе деформирования. На рис. 3-6 представлены полученные зависимости влияния величины редукции и скорости деформирования на сжимающие и растягивающие напряжения.

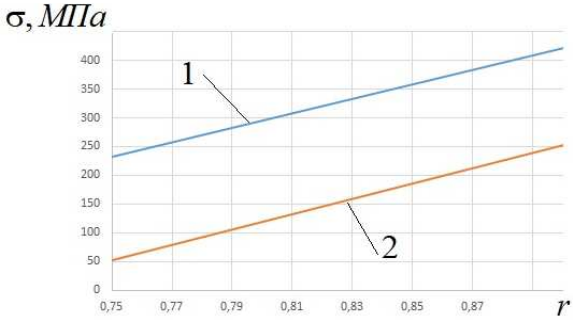


Рис. 3. Влияние величины редукции и скорости деформирования на максимальные сжимающие напряжения ($t = 5$)***: 1*** - $V = 10$ *мм / мин*; ***2*** - $V = 1$ *мм / мин*

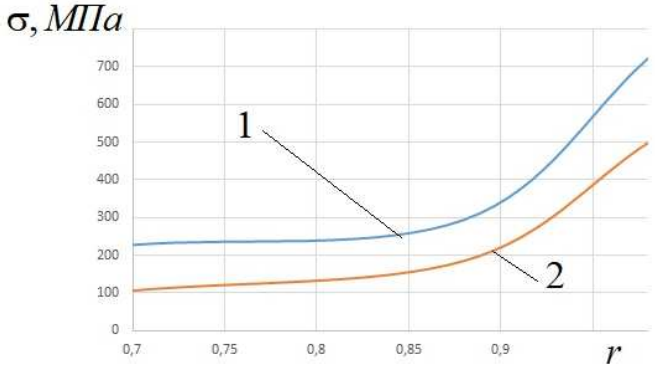


Рис. 4. Влияние величины редукции и скорости деформирования на максимальные сжимающие напряжения ($t = 15$***):1 -*** $V = 10 мм/мин$***;***
2 - $V = 1 мм/мин$

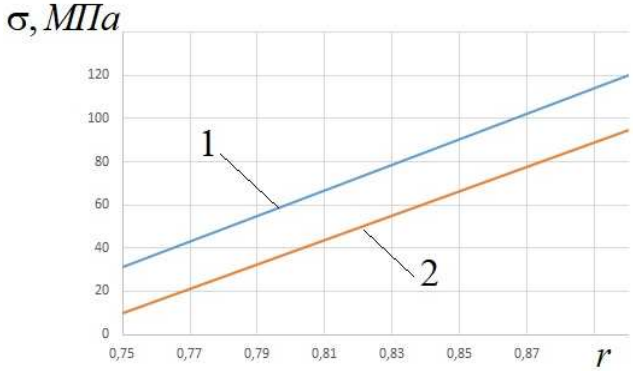


Рис. 5. Влияние величины редукции и скорости деформирования на максимальные растягивающие напряжения ($t = 5$***):***
1 - $V = 10 мм/мин$***; 2 -*** $V = 1 мм/мин$

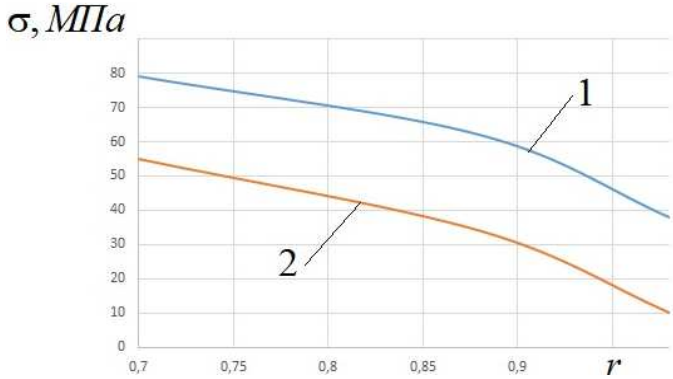


Рис. 6. Влияние величины редукции и скорости деформирования на максимальные сжимающие напряжения ($t = 15$***): 1 -*** $V = 10 мм/мин$***;***
2 - $V = 1 мм/мин$

Анализ графиков, представленных на рис. 3-6 позволил установить, что увеличение величины редукции приводит к росту сжимающих напряжений для всех рассматриваемых толщин трубных заготовок. Растягивающие напряжения для трубных заготовок толщиной 5 мм с ростом редукции растут, но для заготовок толщиной 15 мм данные напряжения снижа-

ются. Снижение скорости деформирования позволяет добиться снижения сжимающих напряжений в 4 раза для заготовок толщиной 5 мм и в 2 раза для заготовок толщиной 15 мм. Растягивающие напряжения так же снижаются с уменьшением скорости деформирования для заготовок толщиной 5 мм они снижаются в 2 раза. для заготовок толщиной 15 мм – на 50 %.

На рис. 7-8 представлены зависимости изменения силы выдавливания для разных толщин заготовок от величины редукции и скорости деформирования.

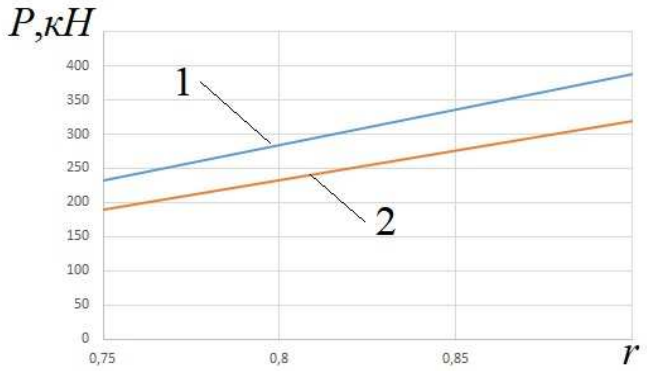


Рис. 7. Влияние величины редукции и скорости деформирования на силу деформирования ($t = 5$***): 1 -*** $V = 10 мм/мин$***; 2 -*** $V = 1 мм/мин$

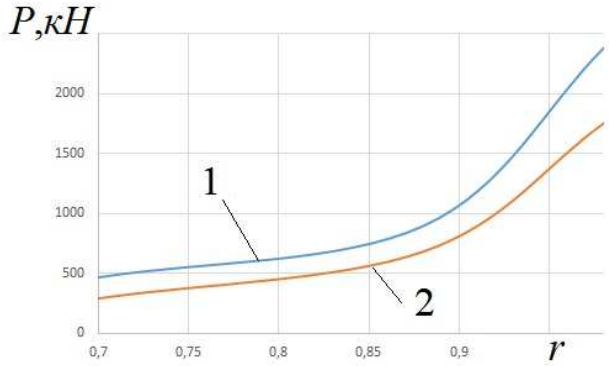


Рис. 8. Влияние величины редукции и скорости деформирования на силу деформирования ($t = 15$***): 1 -*** $V = 10 мм/мин$***; 2 -*** $V = 1 мм/мин$

Проанализировав данные, показанные на рис. 7 и 8 можно сделать выводы, что для разных толщин стенок заготовки зависимость изменения силы от редукции выглядит по-разному. Для толщины 5 мм эта зависимость носит линейный характер, и с увеличением редукции с 0,75 по 0,9 сила растет на 50 %. Для толщины стенки 15 зависимость носит нелинейный характер. Здесь до значений редукции 0,85 сила растет на 30 %. Начиная со значений редукции 0,85 сила увеличивается более интенсивно - в 4 раза.

Полученные результаты можно использовать как рекомендации при создании технологических процессов изготовления корпусных изделий из трубных заготовок.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 20-08-00541.

Список литературы

1. Теория пластических деформаций металлов / Е.П. Унксов, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров и др. М.: Машиностроение, 1983. 598 с.

2. Zhengyang Cai, Min Wan, Zhigang Liu, Xiangdong Wu, Bolin Ma, Cheng Cheng Thermal-mechanical behaviors of dual-phase steel sheet under warm-forming conditions // International Journal of Mechanical Sciences. 2017. Volume 126. P. 79-94.

3. Verena Krusel, Peter Birnbaum, Andreas Kunke, Rafael Wertheim Metastable material conditions for forming of sheet metal parts combined with thermomechanical treatment // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2016. Volume 65. Issue 1. P. 301-304.

4. Aksenov S.A., Chumachenko E.N., Kolesnikov A.V., Osipov S.A. Determination of optimal gas forming conditions from free bulging tests at constant pressure // Journal of Materials Processing Technology. 2015. Volume 217. P. 158-164.

5. Kyung-Hun Leea, Byung-Min Kim Advanced feasible forming condition for reducing ring spreads in radial–axial ring rolling International Journal of Mechanical Sciences. 2013. Volume 76. P. 21-32.

Пасынков Андрей Александрович, канд. техн. наук, доцент, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Матасов Игорь Игоревич, соискатель, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Яковлев Борис Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ISOTHERMAL DEFORMATION OF THICK-BASED HOUSING PRODUCTS IN A CYLINDRICAL MATRIX

A.A. Pasynkov, I.I. Matasov, B.S. Yakovlev

The article presents the results of studies based on modeling the process of isothermal extrusion of a difficult workpiece from an aluminum alloy. It is assumed that the products have a bottom several times thicker than the wall thickness. The change in the stress-strain state of the workpiece and the power parameters are analyzed.

Key words: back extrusion, tube billets, research analysis.

Pasynkov Andrey Alexandrovich, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Matasov Igor Igorevich, applicant, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Yakovlev Boris Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.771

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ В МАТРИЦУ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

Л.Е. Гололобова

В работе рассмотрено изотермическое обратное выдавливание трубной заготовки в матрицу квадратного сечения. Данный процесс проанализирован в части оценки геометрии получаемых изделий, напряжений в теле изделия возникающих в процессе штамповки.

Ключевые слова: обратное выдавливание, трубные заготовки, матрица квадратного сечения.

Интерес представляет изготовление корпусных изделий квадратного сечения с отверстием в донной части из трубных заготовок. В статье рассмотрена операция, заключающаяся в медленном формоизменении трубной заготовки из алюминиевого сплава АМг4. В качестве инструмента использовалась матрица квадратного сечения с шириной стенки $b_{матр}$=100 мм, пуансон с шириной стенки $b_{пуанс} = 90, 95$ мм. Заготовкой являлась труба высотой 60 мм, диаметром 100 мм и толщиной стенки 15 мм. Диаметр отверстия в матрице был равен $D = 60$ мм. Процесс осуществлялся при постоянной температуре формоизменения $T = 450°C$. На рис. 1 дана схема операции.

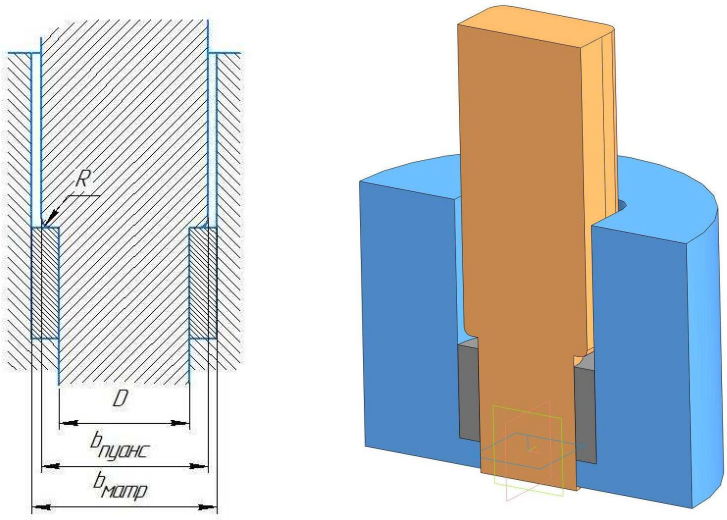
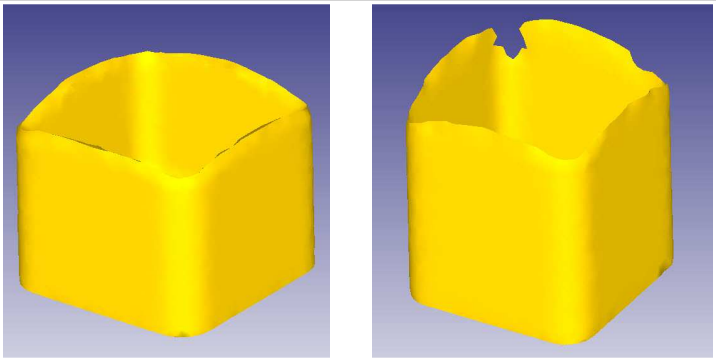
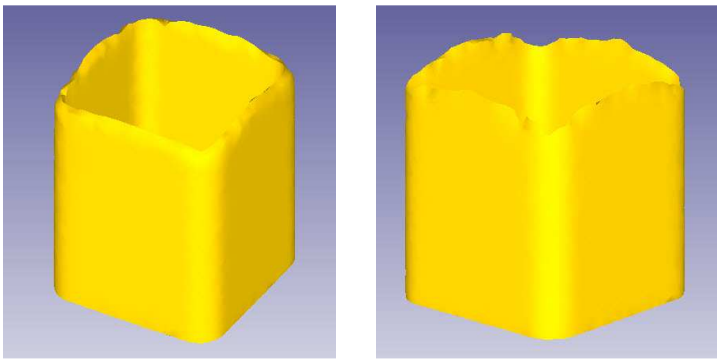


Рис. 1. Схема выдавливания

В программе DEFORM был выполнен анализ выдавливания. На рис. 2 представлены эскизы изделий, полученных по результатам моделирования.



$V = 50\ мм/мин$



а **б**

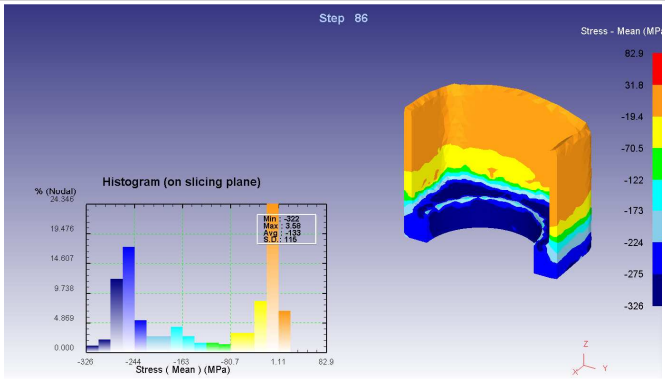
$V = 1 мм/мин$

Рис. 2. Эскизы изделий: а - $b_{пуанс} = 90$ ***мм; б -*** $b_{пуанс} = 95$ ***мм***

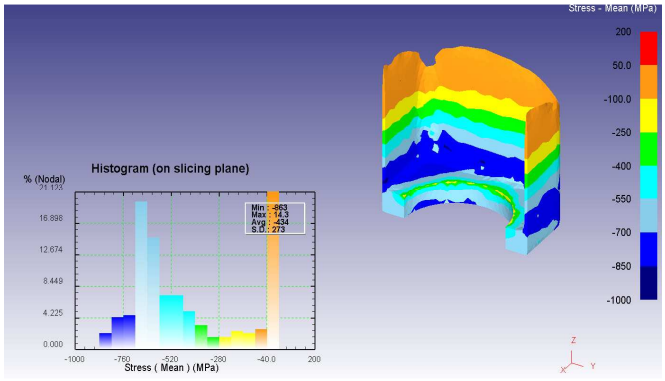
На рис. 2 скорость деформирования $V = 50\ мм/мин$ соответствует обычному скоростному режиму штамповки, скорость $V = 1 мм/мин$ соответствует режиму кратковременной ползучести. Из рис. 2 видно, что в изделии наблюдается неравномерность в части сформированности стенок. При увеличении степени деформации (увеличении размеров пуансона) эта неравномерность усиливается, особенно заметно это в углах изделия. Уменьшение скорости деформирования положительно сказывается на формирование краевой части изделия. При толщине пуансона $b_{пуанс} = 90$ мм стенка формируется равномерно. При толщине пуансона $b_{пуанс} = 95$ мм стенка формируется неравномерно, но все же заметно лучше чем для случая с большей скоростью. Изменение параметров трения по периметру пуансона очевидно поспособствует улучшению в формировании геометрии стенки.

На рис. 3 представлены схемы, показывающие сформированные средние нормальные напряжения в объеме изделия при скорости деформирования $V = 50\ мм/мин$.

На рис. 4 представлены схемы, показывающие сформированные средние нормальные напряжения в объеме изделия при скорости деформирования $V = 1\ мм/мин$.

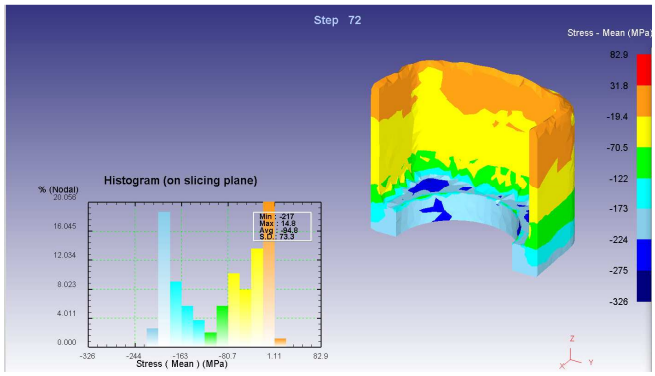


а

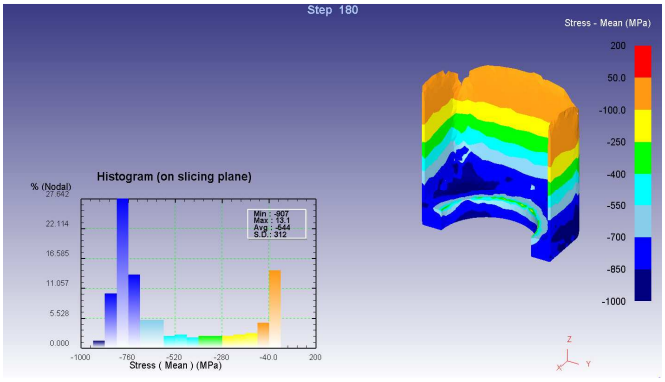


б

Рис. 3. Оценка распределения средних нормальных напряжений в детали: а - $b_{пуанс}=90$ мм; б - $b_{пуанс}=95$ мм



а



б

Рис. 4. Оценка распределения средних нормальных напряжений в детали: а - $b_{пуанс}=90$ мм; б - $b_{пуанс}=95$ мм

Анализ полученных результатов, проиллюстрированных на рис. 3, 4 позволил сказать, что рост скорости деформирования при постоянной степени деформации (неизменном размере пуансона) приводит к росту сжимающих напряжений (синий цвет на схемах). Растягивающие напряжения при росте скорости либо не изменяются, либо снижаются. Здесь стоит отметить, что наибольшие растягивающие напряжения наблюдаются в верхних частях стенки, и их рост очевидно связан с улучшением формирования краевых частей стенок.

Увеличение поперечных размеров пуансона приводит более чем трехкратному росту и сжимающих и растягивающих напряжений. Но здесь можно сказать, что благодаря температурным режимам не наблюдается превышения их допустимых значений.

Таким образом при производстве коробчатых изделий из трубных заготовок стоит уделять внимание скоростным режимам деформирования.

Работа выполнена под руководством к.т.н., доц. Пасынкова А.А.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 20-08-00541.

Список литературы

1. Ларин С.Н., Пасынкова Н.С., Пасынков А.А. Анализ силовых параметров процесса выдавливания прутковой заготовки в матрицу квадратного сечения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 3. С. 468-473.

2. Verena Krusel, Peter Birnbaum, Andreas Kunke, Rafael Wertheim Metastable material conditions for forming of sheet metal parts combined with thermomechanical treatment // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2016. Volume 65. Issue 1. P. 301-304.

3. Aksenov S.A., Chumachenko E.N., Kolesnikov A.V., Osipov S.A. Determination of optimal gas forming conditions from free bulging tests at constant pressure // Journal of Materials Processing Technology. 2015. Volume 217. P. 158-164.

4. Пасынков А.А., Гурова О.Ю. Анализ напряженно-деформированного состояния при изотермическом обратном выдавливании прутковых заготовок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 2. С. 382-387.

5. Пасынков А.А., Недошивин С.В., Абрамов С.С. Анализ напряженного состояния при изотермическом обратном выдавливании прутковых заготовок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 3. С. 473-480.

Гололобова Любовь Евгеньевна, магистрант, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYSIS OF THE PROCESS OF REVERSE EXTRUSION OF A PIPE BILLET INTO A SQUARE SECTION MATRIX

L.E. Gololobova

The paper discusses the isothermal backward extrusion of a tube blank into the matrix of square section. This process is analyzed in terms of evaluating the geometry of the resulting products, stresses in the body of the product that occur during the stamping process.

Key words: reverse extrusion, tube blanks, square cross-section matrix.

Gololobova Lyubov Evgenievna, undergraduate, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.983; 539.374

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИН НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ДЕТАЛИ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ВЫДАВЛИВАНИИ

С.С. Абрамов

Исследован процесс комбинированного выдавливания стальных прутковых заготовок в части анализа напряжений и деформаций в зависимости от степени деформации. Результаты представлены в виде графических зависимостей.

Ключевые слова: обработка давлением, комбинированное выдавливание, напряжение, сила.

В работе на основании моделирования процесса комбинированного выдавливания стальных прутковых заготовок выполнена оценка изменения показателей напряженного и деформированного состояния заготовки в зависимости от величины редукции. На рис. 1 представлена схема процесса. Моделирование выполнено с помощью комплекса для расчетов процессов обработки давлением DEFORM.

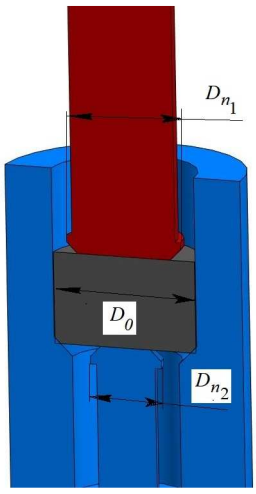


Рис. 1. Схема исследуемого процесса выдавливания

Процесс исследовался для инструмента с размерами: $D_0 = 80$ мм, $D_{n1} = 48...70$ мм, $D_{n2} = 40...48$ мм, $D_м = 60$ мм. В качестве заготовки принимался пруток из стали 45 диаметром 80 мм и высотой 25 мм.

Основным варьируемым параметром для оценки процесса служила величина редукции, равная $r = \frac{D_0^2 - (D_0^2 - D_{n1}^2)}{D_0^2}$. Выполнялось моделирование данного процесса при разных значениях редукции и коэффициента трения.

На рис. 2 приведена графическая зависимость, устанавливающая влияние величины редукции на максимальные растягивающие напряжения в изделии.

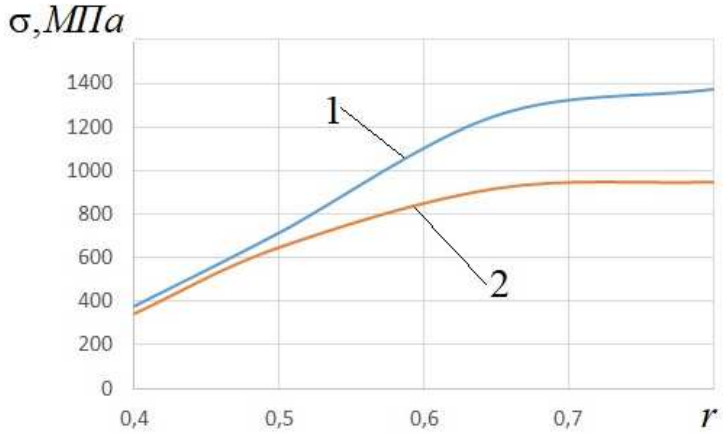


Рис. 2. Зависимость максимальных растягивающих напряжений в изделии от величины редукции: 1 - $\mu = 0{,}08$ ***; 2*** - $\mu = 0{,}12$

Судя по представленной на рис. 2 зависимости с ростом величины редукции происходит постоянный рост растягивающих напряжений в изделии. Увеличение редукции с 0,4 до 0,8 ведет к росту напряжений в 3 раза. Рост коэффициента трения приводит к снижению растягивающих напряжений.

На рис. 3 приведена графическая зависимость, устанавливающая влияние величины редукции на максимальные сжимающие напряжения в изделии.

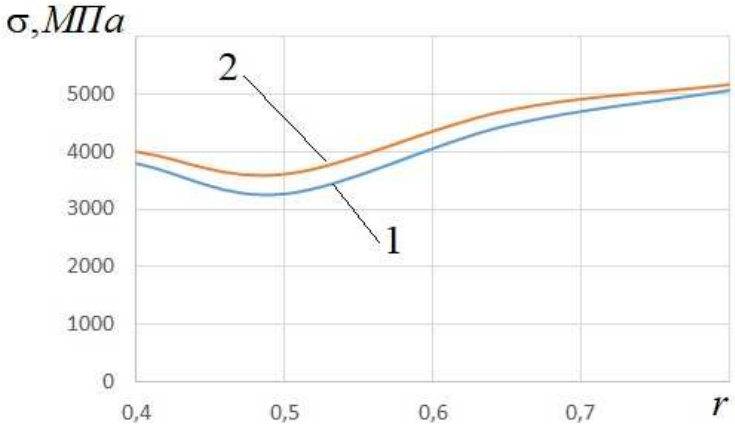


Рис. 3. Зависимость максимальных сжимающих напряжений в изделии от величины редукции: 1 - $\mu = 0{,}08$ ***; 2*** - $\mu = 0{,}12$

Анализ рис. 3 показывает, что увеличение значения редукции с 0,4 до 0,5 ведет к снижению сжимающих напряжений на 20 %. Затем с ростом значения редукции до 0,8 сжимающие напряжения начинают расти на 35 %. Увеличение трения между инструментами приводит к росту сжимающих напряжений на 10 %.

На рис. 4 приведена графическая зависимость, устанавливающая влияние величины редукции на значение силы на деформирующем пуансоне.

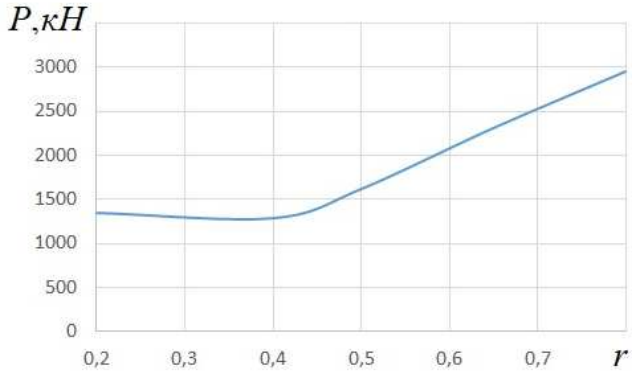


Рис. 4. Зависимость максимальных растягивающих напряжений в изделии от величины редукции: 1 - $\mu = 0{,}08$ ***; 2*** - $\mu = 0{,}12$

Анализ рис. 4 показывает, что рост значения редукции с 0,4 до 0,5 приводит к снижению сил на деформирующем пуансоне на 8 %. Затем с ростом значения редукции до 0,8 силы на деформирующем пуансоне начинают расти в 2,5 раза.

В заключении стоит отметить, что напряженное состояние в детали заметно зависит от величины редукции. Имеются определенные оптимальные значения величины редукции, позволяющие минимизировать сжимающие напряжения и силы.

Работа выполнена под руководством д.т.н., проф. Ларина С.Н.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 20-08-00401.

Список литературы

1. Ларин С.Н., Пасынков А.А., Булычев В.А. Анализ течения металла при комбинированном выдавливании стальных заготовок с плоскоконусным инструментом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 2. С. 355-360.

2. Ларин С.Н., Трегубов В.И., Исаева А.Н., Ларина М.В. Напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе комбинированного выдавливания // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 2. С. 375-381.

3. Ларин С.Н., Пасынков А.А., Недошивин С.В., Исаева А.Н. Оценка напряженно-деформированного состояния изделия при комбинированном выдавливании прутковой заготовки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 3. С. 454-460.

4. Чудин В.Н., Пасынков А.А. Нестационарные процессы изотермической штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2018. №6. С. 23-28.

5. Пасынков А.А., Борискин О.И., Ларин С.Н. Теоретические исследования операции изотермической раздачи труб из труднодеформируемых цветных сплавов в условиях кратковременной ползучести // Цветные металлы. 2018. №2. С. 74-78.

Абрамов Сергей Сергеевич, студент, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

INVESTIGATION OF THE VALUES OF STRESSES AND DEFORMATIONS IN THE PART DURING COMBINED EXTRUSION

S.S. Abramov

The process of combined extrusion of steel bar billets is studied in terms of stress and strain analysis depending on the degree of deformation. The results are presented in the form of graphical dependencies.

Key words: metal forming, composite squeezing, strain, strength.

Abramov Sergey Sergeevich, student, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.771

ОЦЕНКА СИЛ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ОБРАТНОМ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ В МАТРИЦУ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

Л.Е. Гололобова

Выполнен анализ влияния скорости деформирования, степени формообразования и геометрических характеристик деформирующего инструмента на значения деформаций и сил на пуансоне при изотермическом выдавливании трубной заготовки в матрицу квадратного сечения.

Ключевые слова: изотермическое выдавливание, трубные заготовки, матрица квадратного сечения, силы.

В статье [1] рассмотрен процесс изотермического выдавливания трубной заковки в матрицу квадратного сечения. Там в частности установлено влияние технологических параметров на напряжения в изделии и формирование геометрии стенки изделия. В данной статье рассмотрим данную операцию в части анализа деформаций и сил на пуансоне. Размеры инструмента примем следующими: $b_{матр}$=100 мм, $b_{пуанс} = 90$ и 95 мм, $D = 60$ мм. Заготовка имеет размеры: высота 60 мм, диаметр 100 мм,

толщина стенки 15 мм. Материал заготовки - алюминиевый сплав АМг4. Процесс проходит при температуре формоизменения $T = 450°C$. На рис. 1 дана схема операции. Моделирование выполнено в программе DEFORM.

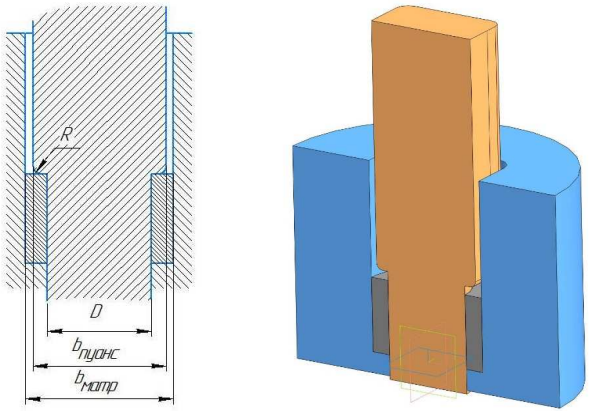
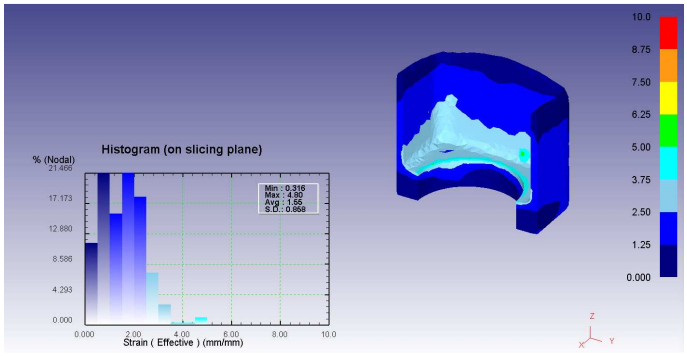


Рис. 1. Схема выдавливания

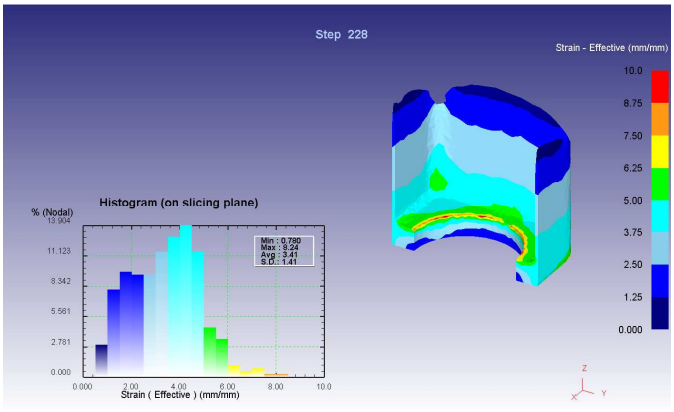
На рис. 2 представлены схемы, позволяющие установить значения деформаций в изделии при скорости деформирования $V = 50$ *мм/мин*.

Из рис. 2 видно, что при увеличении ширины пуансона в рассматриваемом диапазоне происходит рост значений деформаций в два раза. Наибольшие значения деформаций в изделии наблюдаются в контакте донной части детали с пуансоном.

На рис. 3 представлены схемы, позволяющие установить значения деформаций в изделии при скорости деформирования $V = 1$ *мм/мин*.

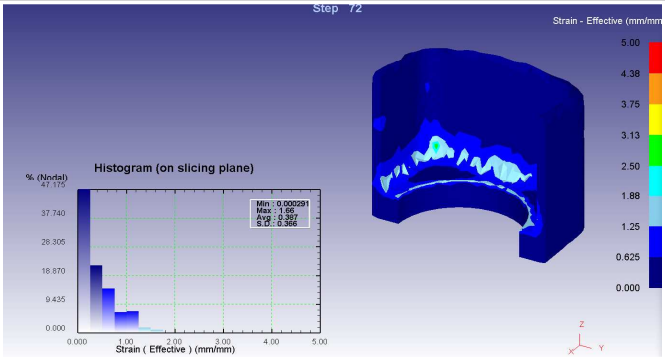


а

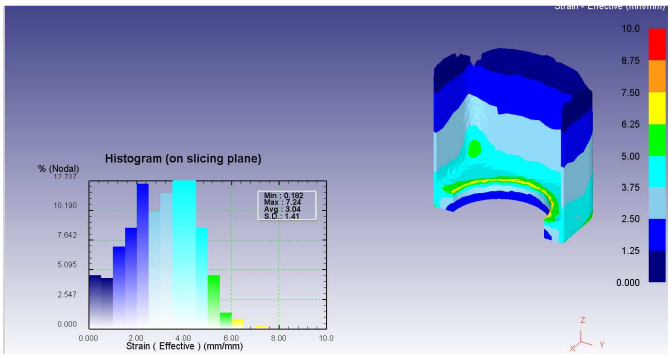


б

Рис. 2. К оценке деформаций в детали: а - $b_{пуанс} = 90$ мм; б - $b_{пуанс} = 95$ мм



а



б

Рис. 3. К оценке деформаций в детали:
а *-* $b_{пуанс} = 90$ ***мм; б*** *-* $b_{пуанс} = 95$ ***мм***

Из рис. 3 видно, что как в предыдущем случае при увеличении ширины пуансона в рассматриваемом диапазоне происходит рост значений деформаций в два раза. Сравнение данных на рис. 2 и 3 показывает, что увеличение скорости деформирования ведет к росту деформаций на 15 % для больших степеней деформации в 3 раза для меньших степеней деформации.

На рис. 4 представлена зависимость изменения силы выдавливания от величины редукции, равной $r = \dfrac{S_0 - S_k}{S_0}$, где S_0 - начальная площадь заготовки в плане; S_k - конечная площадь изделия в плане.

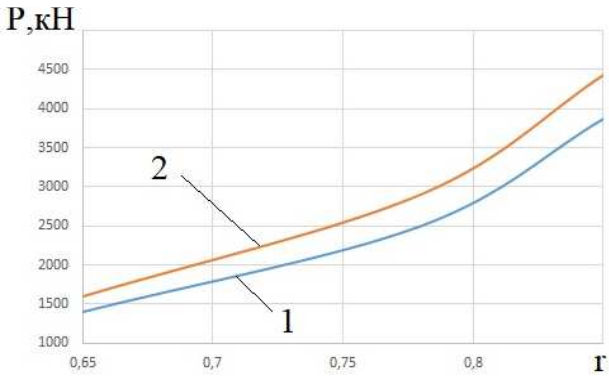


Рис. 4. Изменение сил выдавливания от редукции:
1 *-* $V = 1$ *мм/мин;* ***2*** *-* $V = 50$ *мм/мин*

Анализируя зависимость на рис.4 можно сказать, что увеличение редукции с 0,65 до 0,85 приводит к увеличению силы деформирования в 2,6 раза. Рост скорости с 1 до 50 мм/мин приводит к росту скорости на 25 %.

Выводы. Наибольшее влияние на силовые характеристики и деформации влияет величина редукции. Уменьшение скорости хоть и не так интенсивно, но в целом положительно влияет на формирование геометрии стенки, снижение сил процесса напряжений и деформаций.

Работа выполнена под руководством к.т.н., доц. Пасынкова А.А.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 20-08-00541.

Список литературы

1. Гололобова Л.Е. Анализ процесса обратного выдавливания трубной заготовки в матрицу квадратного сечения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 5. С. 453 – 457.

2. Ларин С.Н., Пасынкова Н.С., Пасынков А.А. Анализ силовых параметров процесса выдавливания прутковой заготовки в матрицу квадратного сечения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 3. С. 468-473.

3. Пасынков А.А., Недошивин С.В., Абрамов С.С. Анализ напряженного состояния при изотермическом обратном выдавливании прутковых заготовок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 3. С. 473-480.

4. Пасынков А.А., Шивцова А.Н., Чистяков М.К. Анализ изменения напряжений при совмещении осадки и выдавливания за один ход ползуна // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 3. С. 495-500.

5. Пасынков А.А., Шивцова А.Н., Чистяков М.К. Оценка силовых режимов при одновременном радиальном выдавливании и осадке // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 3. С. 501-506.

Гололобова Любовь Евгеньевна, магистрант, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ESTIMATION OF FORCES AND DEFORMATIONS DURING REVERSE ISOTHERMAL EXTRUSION OF A PIPE BILLET INTO A SQUARE SECTION MATRIX

L.E. Gololobova

The analysis of the influence of the rate of deformation, the degree of shaping and geometric characteristics of the deforming tool on the values of deformations and forces on the punch during isothermal extrusion of a pipe billet into a square cross-section matrix is performed.

Key words: isothermal extrusion, tube billets, square cross-section matrix, forces.

Gololobova Lyubov Evgenievna, undergraduate, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.77.01; 621.7.011

ОПТИМИЗИРОВАННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОХОТНИЧЬИХ ГИЛЬЗ

С.Н. Ларин, В.И. Платонов, К.С. Ремнев

Гильзовая оболочка является обобщающим элементом для всех типов патронов. Конструкция гильзы патрона должна отвечать следующим технологическим условиям: надежно объединять в единое целое составные элементы патрона; обеспечивать обтюрацию при выстреле; осуществлять долговременное хранение с защитой от внешних воздействий. В работе рассматриваются основные типы конструкций охотничьих гильз, объединяющие их признаки, способы их изготовления. Предлагается новый технологический процесс изготовления гильз охотничьих патронов.

Ключевые слова: вытяжка, выдавливание, инструмент, оболочка, технологический процесс.

Современное гильзовое производство в основном направлено на изготовление цельнотянутых металлических оболочек с использованием латунных, стальных, биметаллических и алюминиевых заготовок [1, 2]. Правильный выбор материала заготовки для гильзы и разработанная технология ее получения играют важную роль не только для обеспечения надежного функционирования оружия, но и повышения эксплуатационных характеристик патрона.

Разработанная технология изготовления гильз при массовом производстве охотничьих патронов позволяет снизить стоимость продукции на 35…40% за счет снижения стоимости гильзы. Снижению стоимости патрона способствует также технология изготовления гильз из стальных заготовок. Но к сожалению, использование стальных гильз при производстве патронов ведет к таким недостаткам как: снижение пластичности гильзы, ведущее к ухудшению обтюрации при выстреле; подверженность гильзы к коррозии снижает сроки хранения гильзы. Эти аспекты необходимо принимать во внимание при обустройстве складского хранения продукции. Использование алюминиевых гильз для патронов малой и средней мощности дает возможность использовать преимущества латунных и нивелировать недостатки стальных гильз. Пластиковые оболочки гильзы ограничивается применением для патронов гладкоствольного охотничьего оружия.

Корпус гильзовой оболочки может иметь различную форму. Использование цилиндрической гильзы отражается в простоте ее изготовления и удобстве снаряжения. Облегчению извлечения стреляной гильзы из патронника ствола способствует придание ей небольшой конусности. Использование гильз бутылочной формы целесообразно при изготовлении мощных патронов. Фиксация цилиндрической гильзы в патроннике осуществляется передним срезом, бутылочной – коническим скатом. Для изъятия гильзы в ее донной части предусматривается кольцевая проточка под выступ выбрасывающего устройства.

По конструктивным элементам гильзы можно предложить следующие классификационные признаки:

1. Геометрическая форма корпуса (рис 1):

а) цилиндрическая форма (форма небольшого усеченного конуса) - 1к;

б) колбообразная форма - 2к;

в) бутылочная форма - 3к.



1к ***2к*** ***3к***

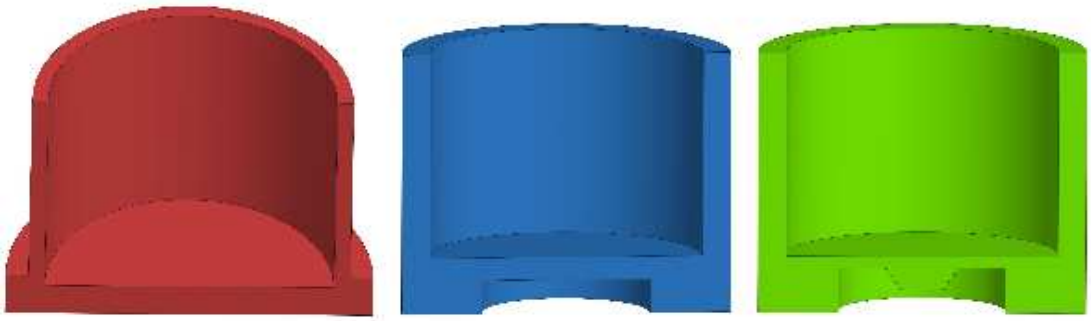
Рис. 1. Геометрическая форма гильзовой оболочки

2. По типу капсюльного гнезда (рис. 2):

а) кольцевое (круговое) воспламенение - 1г;

б) центральное воспламенение от капсюля закрытого типа («Жевело») - 2г;

в) центральное воспламенение от капсюля открытого типа («Центробой») - 3г.



1г ***2г*** ***3г***

Рис. 2. Тип капсюльного гнезда

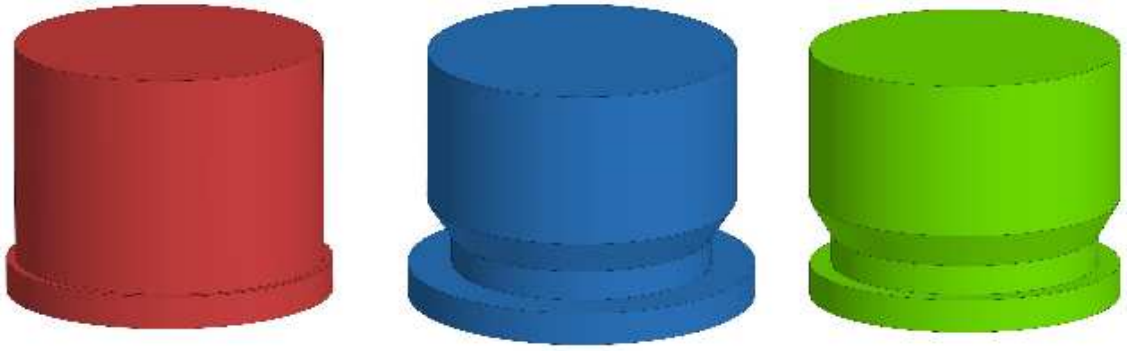
3. Форма фланцевого участка (рис. 3):

а) простой фланец - 1ф;

б) фланец с проточкой - 2ф;

в) безфланцевая - 3ф.

На основе приведенных классификационных признаков можно использовать определенные технологические операции формирования основных элементов гильзы. Например, корпус гильзы, обладающий классификационным признаком «1г», может изготавливаться только применением многооперационной вытяжки с утонением стенки.



1ф ***2ф*** ***3ф***

Рис. 3. Форма фланца гильзы

Проведенный обзор конструкций гильзовых оболочек позволяет на основе обобщенной технологической модели разработать унифицированный технологический процесс изготовления гильзовых оболочек.

Особенностью предлагаемого технологического процесса является то, что в качестве полуфабриката используется цилиндрическая заготовка, предварительно отрезанная или высаженная от проволоки или прутка. Затем холодным комбинированным выдавливанием заготовку деформируют до получения полого стаканчика, затем осуществляют последовательность операций вытяжек с утонением стенки без формоизменения донного участка [3, 5].

Предварительную высадку полуфабриката осуществляют с целью перераспределения образующихся при резке микро- и макротрещин с краев к центру полуфабриката, которые при дальнейшей обработке попадают в зону высоких гидростатических давлений и залечиваются [4].

Применение процесса, комбинированного прямого и обратного выдавливания для деформирования полуфабриката позволяет сократить 2 формоизменяющих операции штамповки донной части, 2 вытяжных операции и определяет необходимость введения 1 операции доштамповки места посадки капсюля. Если фланцевый элемент оформлять деформированием пластически, то операция осуществляется с одновременной калибровкой донного участка. Третья часть технологического процесса не изменяется.

В новом технологическом процессе устраняются три главных недостатка: ликвидировано образование микротрещин; значительно улучшены показатели разнотолщинности заготовок; снижено количество операций в технологическом процессе и увеличен коэффициент использования мате-

риала (до 95%). Все приведенные мероприятия позволяют отойти от применения автоматизированных роторных линий на первых двух периодах технологического процесса.

Рассмотрев существующие формы изделий, применяемый материал заготовок, геометрические размеры, предлагается заменить некоторые вытяжные операции на процессы совмещенного выдавливания одновременно в прямом и обратном направлениях. Данная технология позволит в качестве исходного полуфабриката применять проволоку или пруток, с последующей разрезкой на мерные заготовки, что позволит существенно уменьшить трудоемкость изготовления, увеличить КИМ и снизить окончательную стоимость готовой продукции и.

Таким образом, предлагаемый технологический процесс включает в себя следующие операции:

1) высадка-отрезка;
2) термохимическая обработка;
3) операция комбинированного выдавливания;
4) термохимическая обработка;
5) операция вытяжки полуфабриката с утонением стенки;
6) обрезка кромки заготовки;
7) штамповка фланцевой части;
8) формирование запальных отверстий;
9) обжим дульца;
10) подрезка дульца;
11) пассивирование.

Новый технологический процесс является унифицированным и может быть использован для гильзовых оболочек различной формы из различных металлов с небольшой корректировкой.

Выводы:

1. Разработанная технология изготовления гильз при массовом производстве охотничьих патронов позволяет снизить стоимость продукции на 35…40% за счет снижения стоимости гильзы.

2. В новом технологическом процессе устраняются три главных недостатка: ликвидировано образование микротрещин; значительно улучшены показатели разнотолщинности заготовок; снижено количество операций в технологическом процессе и увеличен коэффициент использования материала (до 95%).

Работа выполнена в рамках гранта администрации Тульской области ДС/ 155.

Список литературы

1. Данилин Г.А. и др. Справочник по технологии патронного производства. Военмех, 2011. 352 с.

2. Данилин Г.А. и др. Основы проектирования патронов к стрелковому оружию. Военмех, 2004. 345 с.

3. Евдокимов А.К., Андрейченко В.А. Холодное выдавливание. Раздел 3. Малоотходная, ресурсосберегающая технология штамповки. Кишинев: Universitas, 1993. 238 с.

4. Ковка и штамповка: справочник. Листовая штамповка / под общ. ред. С.С. Яковлева; ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2010. Т. 4. 732 с.

5. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки. /Гречников Ф.В., Дмитриев А.М., Кухарь В.Д. и др.; под общ. ред. А.Г. Овчинникова. М.: Машиностроение,1985. 184 с.

Ларин Сергей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Платонов Валерий Иванович, канд. техн. наук, доцент, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ремнев Кирилл Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

OPTIMIZED MANUFACTURING PROCESS FOR HUNTING CARTRIDGES

S.N. Larin, V.I. Platonov, K.S. Remnev

The shell casing is a generalizing element for all types of cartridges. The design of the cartridge case must meet the following technological conditions: reliably combine the component elements of the cartridge into a single whole; provide obturation when fired; carry out long-term storage with protection from external influences. The paper deals with the main types of designs of hunting cartridges, combining their features, methods of their manufacture. A new technological process for manufacturing cartridges for hunting cartridges is proposed.

Key words: extraction, extrusion, tool, shell, process.

Larin Sergey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Platonov Valeriy Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Remnev Kirill Sergeevich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.983; 539.374

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ВЫДАВЛИВАНИИ В ГЛАДКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ

Л.Е. Гололобова

Приводятся результаты напряженно-деформированного состояния заготовки при холодном комбинированном выдавливании прутковой стальной заготовки в гладкой цилиндрической матрице. Получены зависимости влияния геометрических характеристик инструмента на напряжения, деформации и силы.

Ключевые слова: комбинированное выдавливание, гладкая матрица, холодная штамповка, анализ.

Рассмотрен процесс выдавливания стальной прутковой заготовки диаметром 40 мм и высотой 25 мм в гладкую цилиндрическую матрицу. Диаметр матрицы принимался ровным $D_м$=40 мм. На рис. 1, а представлена схема процесса. Интерес представляет оценка напряжений, деформаций и сил выдавливания в зависимости от относительного диаметра пуансона, радиуса скругления инструмента. Считали, что деформирование осуществляется перемещением верхнего пуансона, нижний остается неподвижным. Диаметры пуансонов принимались равными $D_{п1} = D_{п2} = 20, 30, 35$ мм.

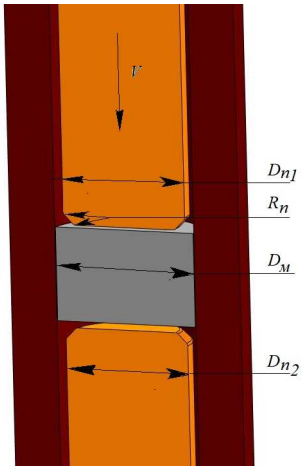
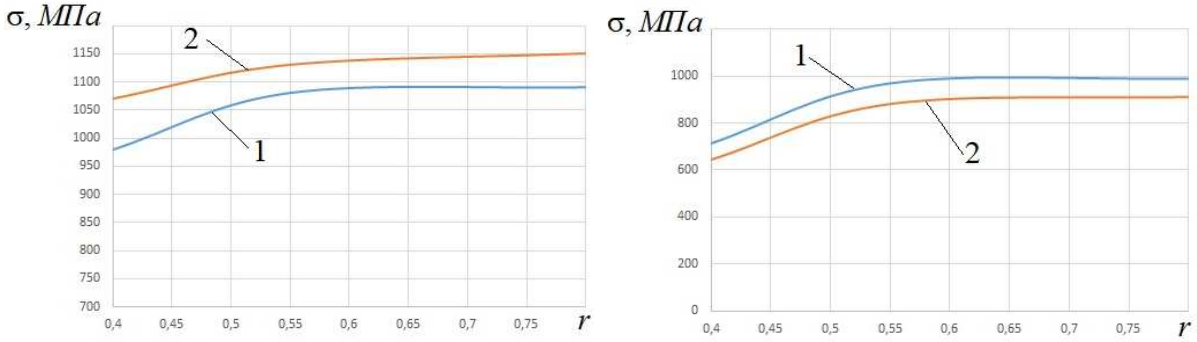


Рис. 1. Схема операции

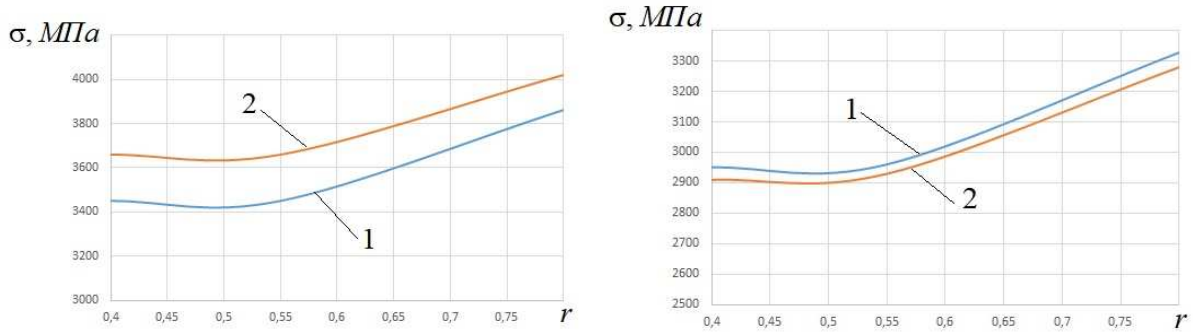
Для исследования влияния геометрических параметров пуансонов на силу выдавливания был выполнен ряд опытов в среде программы DEFORM. По их результатам были построены зависимости влияния редукции $R = \dfrac{D_м^2 - (D_м^2 - D_{п1}^2)}{D_м^2}$.

На рис. 2 даны зависимости влияния редукции и коэффициента трения на значения растягивающих нормальных напряжений для разных значений величины скругления рабочих кромок пуансонов. На рис. 3 даны зависимости влияния редукции на значения сжимающих нормальных напряжений.



а ***б***

Рис. 2. Зависимость влияния редукции на растягивающие нормальные напряжения: а - $R_n = 1$ ***мм; б -*** $R_n = 3$ ***мм; 1 -*** $\mu = 0{,}08$ ***мм; 2 -*** $\mu = 0{,}12$

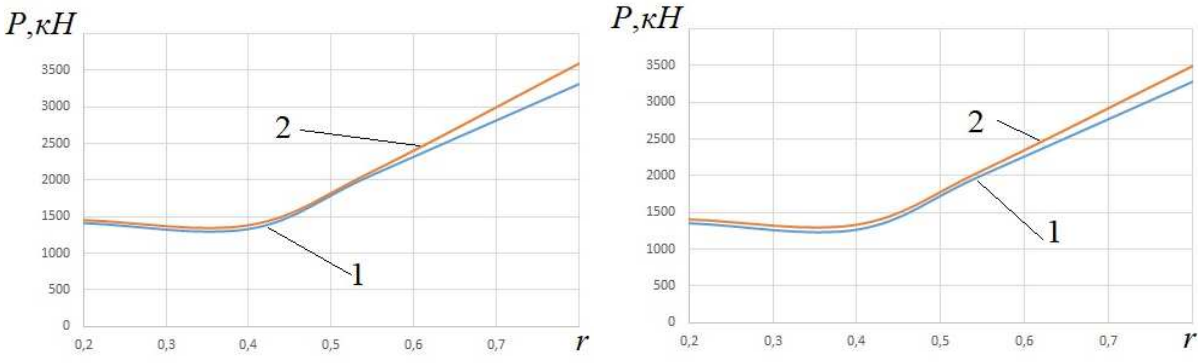


а ***б***

Рис. 3. Зависимость влияния редукции на сжимающие нормальные напряжения: а - $R_n = 1$ ***мм; б -*** $R_n = 3$ ***мм; 1 -*** $\mu = 0{,}08$ ***мм; 2 -*** $\mu = 0{,}12$

Анализ данных зависимостей показал, что рост редукции приводит к росту и сжимающих и растягивающих напряжений, но для сжимающих напряжений в отличие от растягивающих зависимость влияния редукции носит противоположный характер. Для растягивающих напряжений с ростом редукции до значения 0,55….0,6 происходит рост их величин на 15…20 %, затем интенсивность роста их величин заметно снижается. Для растягивающих напряжений до значения 0,55…0,6 напряжения практически не изменяются, а затем начинается рост их величин на 15…20 %. С увеличением радиуса скругления пуансона с 1 до 3 мм напряжения растут на 10 %. Рост величины трения приводит к росту напряжений на 10 %.

На рис. 4 даны зависимости влияния редукции и коэффициента трения на значения силы на деформирующем пуансоне для разных значений величин скругления рабочих кромок пуансонов.



а ***б***

Рис. 4. Зависимость влияния редукции на силу на деформирующем пуансоне: а - $R_n = 1$ ***мм; б -*** $R_n = 3$ ***мм; 1 -*** $\mu = 0{,}08$ ***мм; 2 -*** $\mu = 0{,}12$

Анализ данных зависимостей показал, что рост редукции с 0,2 до 0,4 приводит к снижению силы на пуансоне на 10 %, а затем со значения редукции 0,4 до 0,8 сила растет на 50 %. Увеличение радиуса скругления пуансона с 1 до 3 мм сила растет на 5%. Рост величины трения приводит к росту сил на 10 %.

Работа выполнена под руководством д.т.н., проф. Ларина С.Н.

Работа выполнена в рамках гранта администрации Тульской области ДС/ 155.

Список литературы

1. Ларин С.Н., Пасынков А.А., Булычев В.А. Анализ течения металла при комбинированном выдавливании стальных заготовок с плоскоконусным инструментом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 2. С. 355-360.

2. Ларин С.Н., Трегубов В.И., Исаева А.Н., Ларина М.В. Напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе комбинированного выдавливания // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 2. С. 375-381.

3. Ларин С.Н., Пасынков А.А., Недошивин С.В., Исаева А.Н. Оценка напряженно-деформированного состояния изделия при комбинированном выдавливании прутковой заготовки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 3. С. 454-460.

4. Чудин В.Н., Пасынков А.А. Нестационарные процессы изотермической штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2018. №6. С. 23-28.

5. Пасынков А.А., Борискин О.И., Ларин С.Н. Теоретические исследования операции изотермической раздачи труб из труднодеформируемых цветных сплавов в условиях кратковременной ползучести // Цветные металлы. 2018. №2. С. 74-78.

Гололобова Любовь Евгеньевна, магистрант, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYSIS OF THE STRESSED-DEFORMED STATE AT COMBINED EXTRUSION IN THE SMOOTH CYLINDRICAL MATRIX

L.E. Gololobova

The results of the stress-strain state of the workpiece during cold combined extrusion of a steel bar stock in a smooth cylindrical matrix are presented. The dependences of the influence of the geometric characteristics of the tool on stress, strain and force are obtained.

Key words: combined extrusion, smooth matrix, cold stamping, analysis.

Gololobova Lyubov Evgenievna, undergraduate, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.77.07

СИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ИЗНОС ИНСТРУМЕНТА ПРИ БОКОВОМ ВЫДАВЛИВАНИИ

И.А. Чижов

Проводится исследование процесса бокового выдавливания, а именно соловые параметры и износ матрицы. Приводятся графики нагрузки и распределение параметра износа при горячем и холодном выдавливании.

Ключевые слова: износ инструмента, силовые параметры, боковое выдавливание, моделирование.

Одной из проблем ОМД являются износ инструмента, происходящий при выдавливании. Метод анализа износа любого инструмента, применяемого в процессах обработки металлов давлением представлен в программном комплексе QForm. Поэтому целью данной работы данной работы является рассмотрение износа матрицы выдавливания по параметру pressureRunout в программе QForm (рис. 1 и 2). В связи с тем, что выдавливание является одним из самых распространенных на практике методов ОМД, то вопрос об износе и долговечности инструмента стоит наиболее остро [1-3].

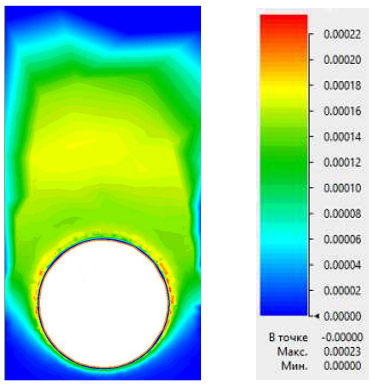


Рис. 1. Износ матрицы при холодном выдавливании

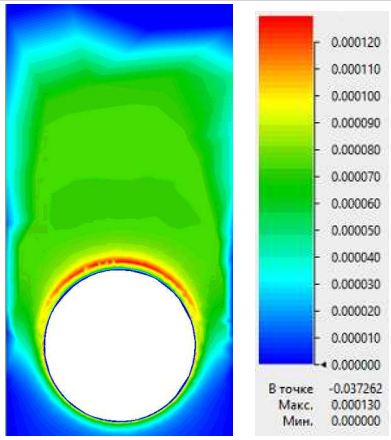


Рис. 2. Износ матрицы при горячем выдавливании

Рассматриваемый в данном случае материал — это алюминиевый сплав AA 1100, в первом случае деформируемый при нормальных условиях, а во втором случае температура составила 450°C. Заготовка представляет собой брус высотой 60 мм, в основании которого лежит квадрат со стороной 15 мм. Инструмент считается жестким, а заготовка пластическая. В зоне бокового отверстия наблюдается наибольшая степень износа инструмента, что связано с интенсивным течением металла в этой области.

Как показали расчеты процесса бокового выдавливания, наибольшее значение максимального показателя износа наблюдается при деформировании холодной заготовки, в то время как износ при деформировании заготовки в горячем виде ниже в 2 раза и составляет 0,00012 условных единиц. Что позволяет увеличить стойкость матрицы выдавливания и увеличить количество возможных выполненных операций. Так же при горячем боковом выдавливании наблюдается более равномерная картина распределения параметра износа, что благоприятно сказывается на длительность эксплуатации штамповой оснастки.

Помимо этого, были рассмотрены величины и графики технологических сил, представленные на рис. с 3 по 4.

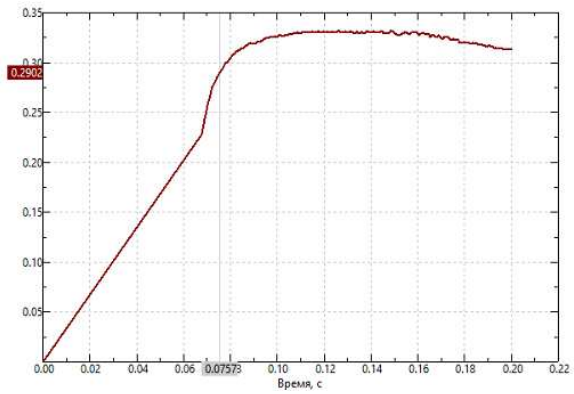


Рис. 3. Сила (МН) холодного выдавливания

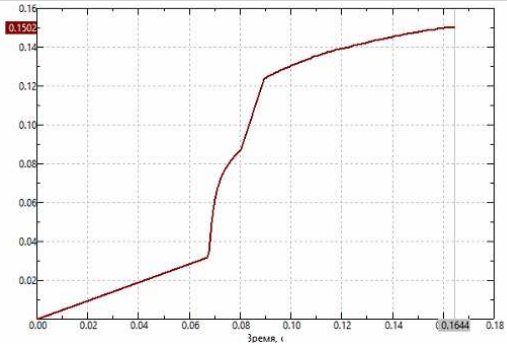


Рис. 4. Сила (МН) горячего выдавливания

Оба графика имеют характерный для такой операции вид. Таким образом, сила штамповки значительно снижается при повышении температуры формоизменения, что в целом объясняется повышением пластичности и снижением сопротивления деформированию при повышении температуры обрабатываемой заготовки. Также горячая штамповка позволяет уменьшить износ матрицы при выдавливании, однако трудовые и финансовые затраты при горячей штамповке существенно выше из-за необходимости предварительного нагрева как заготовки, так и инструмента. Что, несомненно, усложняет весь технологический процесс и увеличивает травмоопасность производства из-за необходимости работы оператора при повышенных температурах окружающей его среды.

Данное моделирование необходимо для выявления закономерностей в силовых параметрах и показателе износа штамповой оснастки при сравнении холодной и горячей обработки металлов давлением.

Список литературы

1. Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.

2. Технология конструкционных материалов: учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. М. Дальский, И. А. Арутюнова, Т. М. Барсукова и др.; под общ. редакцией Дальского А.М. М.: Машиностроение, 1985. 448 с.

3. Голенков В.А., Дмитриев А.М., Кухарь В.Д., Радченко С.Ю., Яковлев С.П., Яковлев С.С. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением. М.: Машиностроение, 2004. 464 с.

Чижов Иван Алексеевич, магистрант, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

POWER PARAMETERS AND WEAR OF THE TOOL AT SIDE EXTRACTION

I.A. Chizhov

A study is being made of the lateral extrusion process, namely, salt parameters and matrix wear. The graphs of the load and the distribution of the wear parameter during hot and cold extrusion are given.

Key words: tool wear, power parameters, lateral extrusion, modeling.

Chizhov Ivan Alekseevich, master, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.979; 621.9

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЦИКЛОГРАММИРОВАНИЯ И АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РОТОРНЫХ КОТЛЕТОФОРМОВОЧНЫХ МАШИН

К.С. Осипова, Е.В. Пантюхина

Рассматриваются вопросы анализа рабочего цикла роторной котлетоформовочной машины, при котором возможно повышение цикловой производительности при формовке котлет круглой формы.

Ключевые слова: котлетоформовочная машина, формование, дозирование, производительность.

Одним из важных сегментов рынка мясной промышленности считаются котлеты, они представляют собой полупродукты, приготовленные из различного мясного фарша с солью, специями и подвергнутые замораживанию. Особой популярностью среди продуктов данного типа пользуются котлеты из говядины, курицы и свинины [1-3]. Ключевыми стадиями приготовления котлет являются процессы дозирования и формования [4]. Наиболее современными и удобными в эксплуатации машинами, которые используются для дозирования и формования котлет в настоящее время, являются роторные котлетоформовочные машины. В статье [5] рассматривался вопрос нерационального размещения ячеек в формовочном столе; с целью определения оптимального количества ячеек был проведен анализ взаимосвязанного влияния основных параметров формовочного стола и размеров котлет цилиндрической формы.

В предыдущей статье [6] были рассмотрены вопросы процесса дозирования фарша в ячейки формовочного стола роторных котлетоформовочных машин и выполнение условия, при котором время движения формовочного стола над окном выдачи порции фарша будет меньше времени его дозирования в ячейку. Для обеспечения процесса дозирования были подобраны частоты формовочного стола и предельно допустимое время при различных радиусах его ячеек.

Цикловая производительность роторной котлетоформовочной машины (шт./ч) определяется по формуле

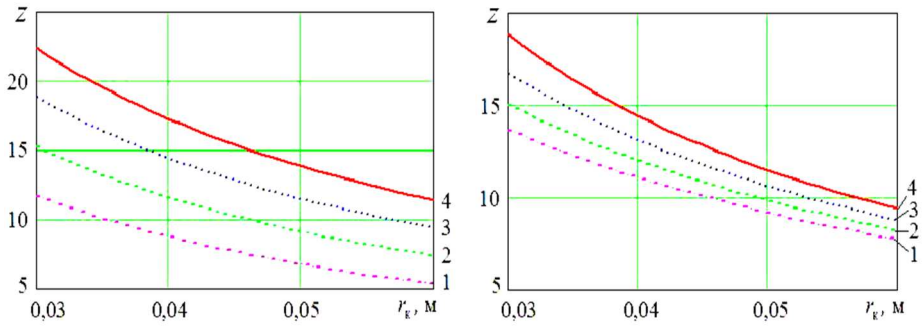
$$П_ц = \frac{60z}{t_{дв} + t_{выт} + t_{сбр} + t_{хх}}, \quad (1)$$

где $t_{дв}$ – время движения формовочного стола; $t_{выт}$ – время выталкивания котлеты; $t_{сбр}$ – время сбрасывания котлеты; $t_{хх}$ – время холостых ходов; z – количество ячеек, которое определяется по полученной авторами формуле

$$z = \frac{2\pi(R_{фс} - \Delta_1 - r_к)}{2r_к + \Delta_2}, \quad (2)$$

в которой $R_{фс}$ – радиус формовочного стола; Δ_1 – зазор между ячейкой и краем стола; $r_к$ – радиус котлеты; Δ_2 – зазор между ячейками.

Для упрощения дальнейших расчетов предлагаются графики для определения количества ячеек z в зависимости от радиуса котлеты в диапазоне от 0,03 до 0,06 м, диаметра формовочного стола от 0,4 до 0,7 м (рис. 1, а) и зазорах между ячейками от 0,01 до 0,05 м (рис. 1, б). Например, при $d_{фс} = 0{,}6$ м и $r_к = 0{,}04$ м, по графикам определяем, что $z = 15$ (рис. 1, а), а при $\Delta_2 = 0{,}04$ м и $r_к = 0{,}05$ получаем $z = 10$ (рис. 1, б).



а ***б***

Рис. 1. Графики для определения количества ячеек от радиуса котлет при диаметрах формовочного стола (а): 1 – $d_{фс} = 0{,}4$ м; 2 – $d_{фс} = 0{,}5$ м; 3 – $d_{фс} = 0{,}6$ м; 4 – $d_{фс} = 0{,}7$ м; зазорах между ячейками (б): 1 – $\Delta_2 = 0{,}05$ м; 2 – $\Delta_2 = 0{,}04$ м; 3 – $\Delta_2 = 0{,}03$ м; 4 – $\Delta_2 = 0{,}02$ м

Время $t_{дв}$ движения формовочного стола

$$t_{дв} = \frac{60\varphi}{\pi n}, \quad (3)$$

где n – частота вращения формовочного стола, φ – угол, характеризуемый размерами ячейки формовочного стола [6].

Время $t_{выт}$ выталкивания котлеты находится по формуле

$$t_{выт} = \frac{R_1 + R_p + \Delta_3}{\upsilon_{выт}} \left(\frac{h_{пхп}}{R_1 + R_p + \Delta_3} - 2\sin^2\frac{\gamma}{2} + \sec\gamma \right), \quad (4)$$

где γ – максимальный угол давления, $\upsilon_{выт}$ – скорость выталкивания, определяемая по формуле

$$\upsilon_{\text{выт}} = \omega \cdot R_{\text{фс}} \cdot \left|\tan\gamma\right|. \quad (5)$$

Максимальный угол давления γ рассчитаем по формуле [7]

$$\gamma = \arcsin\sqrt{\frac{h_{\text{п}}}{2R}}, \quad (6)$$

где $h_{\text{П}}$ – ход поршней, определяемый по выражению

$$h_{\text{п}} = \frac{z \cdot V_{\text{я}}}{2\pi \cdot R_{фс}}, \quad (7)$$

в котором $V_{\text{я}}$ – объем ячейки для котлеты

$$V_{\text{я}} = h \cdot \pi \cdot r_{\text{к}}{}^2, \quad (8)$$

где h – толщина котлеты.

Радиус дуги окружности R, которой очерчен теоретический профиль копира на участке сопряжения, определяется

$$R = R_1 - R_{\text{р}}, \quad (9)$$

где R_1 – радиус сопряжения практического профиля ($R_1 = h_{\text{пхп}}$); $h_{\text{пхп}}$ – полный ход поршня ($h_{\text{пхп}} = h_{\text{п}} + \Delta_3$); Δ_3 – зазор опускания; $R_{\text{р}}$ – радиус ролика ($R_{\text{р}} = 0{,}3 \cdot R_1$).

Время $t_{\text{сбр}}$ сбрасывания котлеты находим по формуле

$$t_{\text{сбр}} = \frac{\beta_0 - \arcsin\left(\frac{R_{\text{фс}}}{\text{R}_{\text{нар}}} \cdot \sin\beta_0\right) \cdot 30}{\pi \cdot n}, \quad (10)$$

где β_0 – угол наклона сбрасывателя (принимаем $\beta_0 = 60^\circ$); $R_{\text{нар}}$ – радиус ротора по периферии, принимаем $\text{R}_{\text{нар}} = R_{\text{фс}} + \Delta_1$).

Время $t_{\text{хх}}$ холостых ходов определяется

$$t_{\text{хх}} = \frac{\alpha_{\text{х}} \cdot \pi}{180 \cdot \omega}, \quad (11)$$

где $\alpha_{\text{хх}}$ – угол холостых ходов, определяемый по выражению

$$\alpha_{\text{хх}} = 360 - (\alpha_{\text{доз}} + \alpha_{\text{выт}} + \alpha_{\text{сбр}}), \quad (12)$$

в котором угол дозирования, выталкивания и сбрасывания соответственно определяются по формулам

$$\alpha_{\text{доз}} = t_{\text{дв}} \cdot \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad \alpha_{\text{выт}} = t_{\text{выт}} \cdot \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad \alpha_{\text{сбр}} = t_{\text{сбр}} \cdot \frac{\pi \cdot n}{30}. \quad (13)$$

Подставив выражения (13) в формулу (12) получим

$$\alpha_{\text{х}} = 360 - (t_{\text{дв}} + t_{\text{выт}} + t_{\text{сбр}}) \frac{\pi \cdot n}{30}. \quad (14)$$

В среде *Mathcad* 15 были построены пространственные графики зависимости цикловой производительности роторной котлетоформовочной машины от радиуса котлеты в диапазоне от 0,03 до 0,06 м, частоты вращения формовочного стола от 1 до 13 об./мин и различных диаметров формовочного стола (рис. 2).

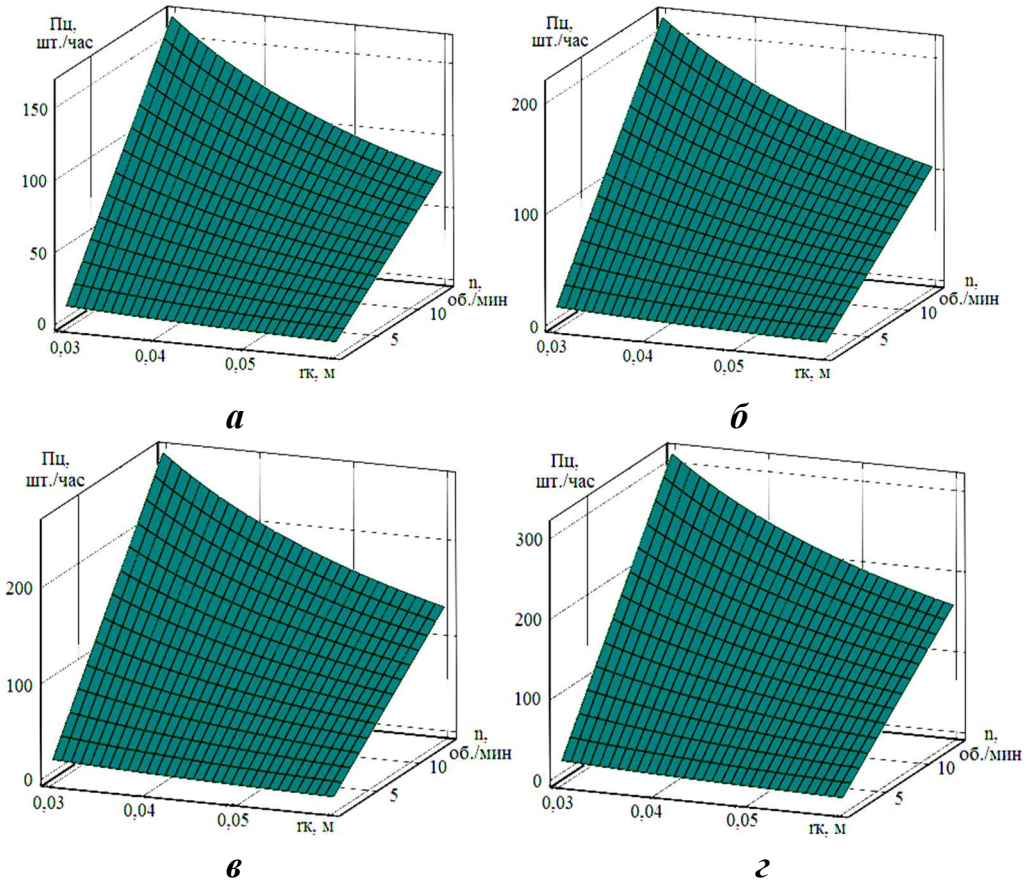


Рис. 2. Графики зависимости цикловой производительности роторной котлетоформовочной машины от радиуса котлет, частоты вращения формовочного стола и различных диаметров формовочного стола: 0,4 м (а); 0,5 м (б); 0,6 м (в) и 0,7 м (г)

При радиусе котлет от $r_к = 0{,}03$ м до $r_к = 0{,}06$ м и диаметре формовочного стола $d_{фс} = 0{,}4$ м цикловая производительность котлетоформовочной машины роторного типа при частоте вращения формовочного стола $n = 6$ об./мин изменяется от 71 до 42 шт./час и от 335 шт./час до 307 шт./час при $n = 13$ об./мин (см. рис. 2, а), при $d_{фс} = 0{,}5$ м производительность составит от 92 до 56 шт./час при $n = 6$ об./мин и от 386 шт./час до 311 шт./час при $n = 13$ об./мин (см. рис. 2, б); при $d_{фс} = 0{,}6$ м цикловая производительность составит от 113 до 70 шт./час при $n = 6$ об./мин и от 439 шт./час до 332 шт./час при $n = 13$ об./мин (см. рис. 2, в), при $d_{фс} = 0{,}7$ м производительность составит от 134 до 83 шт./час при $n = 6$ об./мин и от 493 шт./час до 357 шт./час при $n = 13$ об./мин (см. рис. 2, г).

Таким образом, с целью повышения цикловой производительности был произведен анализ рабочего цикла роторной котлетоформовочной машины, при котором было выявлено, что производительность машины в среднем увеличилась в 1,6 раза при диаметрах формовочного стола от 0,4 до 0,7 м. Для этой цели рекомендуется выбирать частоту вращения формовочного стола в зависимости от радиуса котлет из указанного выше диапазона.

Список литературы

1. Осипова К.С., Давыдов И.Б., Пантюхина Е.В. Особенности и основные виды упаковки различных видов замороженных полуфабрикатов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 11. С. 617-623.

2. Артёмова Е.И., Пантюхина Е.В., Осипова К.С. Вопросы повышения мощности привода волчков для среднего измельчения мясного сырья // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 12. С. 465-468.

3. Артёмова Е.И., Осипова К.С., Пантюхина Е.В. Анализ производительности и мощности куттера для тонкого измельчения мясного сырья // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 3. С. 472-475.

4. Осипова К.С., Пантюхина Е.В. Оценка мощности привода роторных котлетоформовочных машин с оптимизированными параметрами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 12. С. 222-225.

5. Осипова К.С., Пантюхина Е.В. Оптимизация основных параметров роторных котлетоформовочных машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 10. С. 508-512.

6. Осипова К.С., Пантюхина Е.В. Анализ процесса дозирования фарша в роторных котлетоформовочных машинах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 4. С. 365-369.

7. Кольман-Иванов Э.Э., Салазкин К.А. Таблеточные машины. М.: Машиностроение, 1966. 224 с.

Осипова Ксения Сергеевна, магистрант, ksjunja-pershina@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Пантюхина Елена Викторовна, канд. техн. наук, доцент, elen-davidova@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

THE ORETICAL FOUNDATIONS OF CYCLOPROPENONE AND PERFORMANCE ANALYSIS ROTARY CUTLET FORMING MACHINES

K.S. Osipova, E.V. Pantyukhina

The article deals with the analysis of the working cycle of a rotary cutlet forming machine, in which it is possible to increase the cyclic productivity when forming round cutlets.

Key words: cutlet forming machine, forming, dosing, productivity.

Osipova Ksenia Sergeevna, masters, ksjunja-pershina@rambler.ru, Russia, Tula, Tula state university,

Pantyukhina Elena Viktorovna, candidate of technical science, docent, elen-davidova@mail.ru, Russia, Tula, Tula state university

УДК 655.3.062.26

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ГРАВИРОВАНИЯ НА МНОГОСЛОЙНОМ МАТЕРИАЛЕ ИЗ ПОЛИКАРБОНАТА

А.В. Зыкова, Е.А. Пухова

Разработана методика оценки качества воспроизведения изобразительной информации – портретных фотографий, предназначенных для визуальной идентификации личности при производстве идентификационных документов, изготавливаемых на многослойном поликарбонатном материале.

Ключевые слова: идентификационный документ, поликарбонатный материал, лазероактивный слой, персонализация, лазерное гравирование, качество изображения.

В настоящее время широко используются идентификационные документы, изготавливаемые на многослойном поликарбонатном материале. Запись информации на такой материал осуществляется путем воздействия лазерным излучением на лазероактивный слой материала. Информация, записываемая по данной технологии, отображает персональные данные владельца документа – фотографии, подписи, биографические данные, а также машиносчитываемые знаки.

Спецификация документов относительно размещения как визуально считываемых, так и машиносчитываемых данных во всех машиносчитываемых паспортах указана в стандарте ИКАО (ICAO – International Civil Aviation Organization, Международная организация гражданской авиации). [1] Несмотря на то, что стандарт ориентирован на паспорта, государствам и организациям выдачи рекомендуется применять его также к другим идентификационным документам размера ID-3 ((125x88) мм), например, к пропуску ООН, документу, удостоверяющему личность моряка, и проездным документам беженцев [1]. При этом в стандарте отсутствует информация о качественных показателях изображений – портретных фотографий, которые являются наиболее важным элементом идентификации личности при оперативном контроле.

Отсутствие таких рекомендаций объясняется спецификой технологического процесса записи на поликарбонатные материалы, которая заключается в том, что производители оборудования и документов стремятся разрабатывать комплексные решения, включающие системы сбора данных, персонализации, выдачи и контроля обращения идентификационных документов под конкретного заказчика. На стадии разработки модификации производственной линии четко регламентируются параметры системы записи, а также марка используемого материала, который будет обеспечивать приемлемый уровень качества. Изменение любого параметра записи или материала приводит к непредсказуемым результатам при воспроизведении информации. Но в современных условиях возникает необходимость в замене материала для удешевления готового документа или в рамках программы импортозамещения. При этом спецификации на лазероактив-

ные пленки из поликарбоната не содержат информации о структурометрических и сенситометрических свойствах материалов, которые непосредственно влияют на качество воспроизведения информации.

На сегодняшний день качественные параметры воспроизведения изображений в системах поэлементной записи обычно отождествляются с характеристиками самой системы записи и регистрирующего материала. Достаточно полно исследованы сенситометрические и структурометрические свойства процессов форматной записи на фотографический материал, но процессы поэлементной записи в лазерных печатных устройствах на полимерный материал исследованы мало.[2] Отсутствие системы сенситометрии для полимерных материалов, чувствительных к лазерному излучению, усложняет проблему управления качеством процесса получения высококачественной цифровой репродукции – фотографии и других персональных данных владельца документа.

Ставится задача разработать методику оценки качества воспроизведения изобразительной информации – портретных фотографий, предназначенных для визуальной идентификации личности при производстве идентификационных документов, изготавливаемых на многослойном поликарбонатном материале. Такая методика позволит регулировать технологический процесс изготовления документов, подбирать материалы, настраивать режимы записи.

В первую очередь необходимо определить параметры качества изображения, которые определяют пригодность фотографии для идентификации личности. В соответствии с работой Азгальдова Г. Г. [3] для этого необходимо выделить базовые признаки, позволяющие сопоставить портретное изображение с реальным человеком и оценить их важность при идентификации, через весовой коэффициент.

Известно, что наиболее информативной в изображении является информация о деталях, которая определяет сюжет и характеризует изображаемый объект. Следующая по значимости является информация о градации и контрасте - за счет них формируется объем в изображении и реалистичность. Также в изображении должна отсутствовать посторонняя шумовая структура, которая мешает воспринимать изображение. [4] Дополнительно для портретных изображений, используемых для идентификации личности, следует рассмотреть такой параметр как геометрическая точность деталей, которая определяет индивидуальные особенности лица.

Таким образом, выделим следующие параметры:

резкость;

контраст;

геометрическая точность;

однородность (отсутствие шумов).

Для определения весового коэффициента проводится процедура экспертного опроса, в процессе которого эксперты присваивают каждому параметру значение весомости, используя шкалу процентов. В опросе участвует 9 экспертов, имеющие навыки работы с персонализированными идентификационными документами.

Эксперт определяет с его точки зрения наиболее важный параметр и присваивает ему значение группового ненормированного коэффициента весомости G_i, равное 100%. Из оставшихся параметров эксперт снова выбирает с его точки зрения наиболее важный и, присваивает ему значение, соответствующее тому во сколько раз (или на сколько процентов) это свойство менее важно по сравнению со свойством, для которого принято G_i = 100%. Если с точки зрения эксперта два или больше параметров имеют одинаковую важность, им назначаются одинаковые значения G_i.

После этого вычисляются средние арифметические значения группового ненормированного коэффициента весомости $\overline{G_i}$, и производится нормирование этих значений таким образом что бы их сумма была равна единице, в результате получен нормированный коэффициент весомости m_i (табл. 1).

Таблица 1

Значение коэффициентов весомости показателей качества

Показатель	Коэффициенты весомости	
	$\overline{G_i}$	m_i
Резкость	100	0,28
Контраст	86	0,24
Геометрическая точность	89	0,25
Однородность	86	0,24

Согласованность мнений экспертов оценивается по величине коэффициента вариации. [5]

Для определения коэффициента вариации используется формула (1)

$$V_i = \frac{S_i}{m_i}, \quad (1)$$

где S_i – среднеквадратическое отклонение коэффициентов весомости i-го показателя качества; m_i – средний коэффициент весомости i-го показателя качества.

Значения коэффициентов вариации приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов вариации и степень согласованности мнений экспертов

Показатель	Коэффициент вариации	Степень согласованности
Резкость	0,00	высокая
Контраст	0,05	высокая
Геометрическая точность	0,08	высокая
Однородность	0,12	выше средней

На основании полученных данных можно сделать вывод, что наиболее важные показатели качества, это резкость и геометрическая точность, при этом такие показатели как контраст и однородность можно использовать как вспомогательные при оценке пригодности фотографии для идентификации личности.

Полученные показатели будут использованы при оценке качества воспроизведения изображений в процессе записи на многослойный поликарбонатный материал путем воздействия лазерным излучением на лазероактивный слой материала.

В качестве тест-объект используется аналог тиражной заявки на изготовление бланков идентификационных документов, содержащий фотографию, текст, шкалу из 10 полей, содержащих 50% серого, размером (5,0х5,0) мм для дополнительного контроля неоднородности и набор графических символов для машинного считывания (рис. 1).



Рис. 1. Тест-объект для контроля качества воспроизведения при записи на многослойный поликарбонатный материал путем воздействия лазерным излучением

Тест-объект выводится на многослойный полимерный материал из поликарбоната на устройстве для лазерного гравирования. В записывающем устройстве в качестве источника света используется волоконный иттербиевый лазер с длиной волны излучения 1064…1074 нм и максимальной мощностью до 50 Вт. В результате воздействия лазера на поликарбонатный материал создается некий визуальный эффект за счет почернения материала с увеличением мощности лазера. Рассматривается три поликарбонатных материала, чувствительных к лазерному излучению - POLYID, Makrofol ID, Verifoil, условия записи не изменяются.

Проводится экспертная оценка портретных изображений по выбранным ранее показателям. В опросе принимает участие 5 экспертов из числа профессионалов. Каждый показатель оценивается баллами от 1-5, где «5» - это наилучшая оценка.

Вид фотографий тест-объектов после печати представлен на рис. 2.

Для обеспечения сопоставимости значений абсолютных показателей проводится операции нормирования для получения дифференцированной оценки ***K***, рассчитанная по формуле (2):

$$K = \frac{Q}{q_{\text{эт}}}, \qquad (2)$$

где Q – абсолютный показатель ($0 \le K \le 5$); $q_{эт}$ – эталонное значение показателя ($q_{эт}=5$).



а ***б*** ***в***

Рис. 2. Фотографии, полученные методом лазерного гравирования на 3-х марках поликарбонатного материала, чувствительного к лазерному излучению:1 – POLYID; 2 - Makrofol ID; 3 – Verifoil

Для расчета комплексного показателя качества $\boldsymbol{K^k}$ необходимо просуммировать все дифференцированные оценки с учетом весомости каждого показателя (формула (3)):

$$K^k = \sum_{i=1}^{n} K_i * m_i \quad , \qquad (3)$$

где $K^к$ – комплексный показатель качества оцениваемого объекта ($0 \le K^к \le 1$); Ki – относительный показатель свойства ($0 \le K \le 1$); mi – коэффициент весомости свойства ($0 < m < 1$); n – число показателей.

На рис. 3 представлены значения комплексного показателя для рассматриваемых материалов.

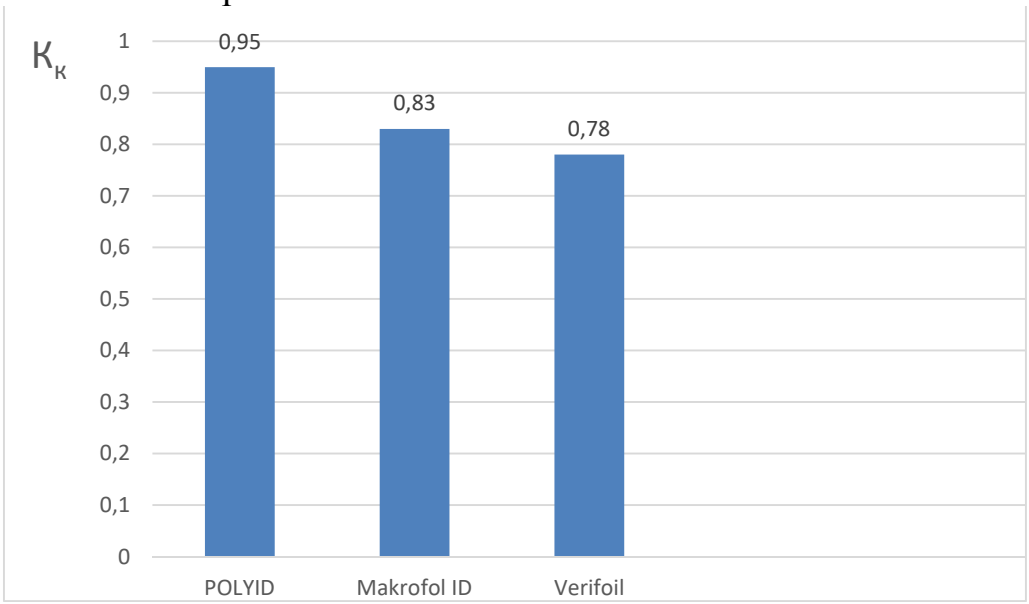


Рис. 3. Диаграмма комплексного показателя качества для трех марок материалов

Согласованность мнений экспертов оценивается по величине коэффициента вариации аналогично формуле (1), она должна быть не ниже средней.

Результат испытаний принимается положительным при выполнении следующих условий:

$K^к \geq 0,8$ для каждого испытуемого образца материала (должна быть обеспечена повторяемость результата);

согласованность мнений экспертов должна быть не ниже средней.

Предложенная методика не решает проблему отсутствия систематизации знаний о процессе, но позволяет в условиях производства принимать решение о пригодности материалов для промышленного применения при условии обеспечения высокого качества готовой продукции. Также предложенная методика может быть использована не только для оценки свойств регистрирующего материала, но и при оценке качества системы воспроизведения в целом.

Список литературы

1. Международная организация гражданской авиации. Doc 9303 Машиносчитываемые проездные документы. Введение. Издание седьмое. 2015. Часть 1. 40 с.

2. Севрюгин В.Р., Андреев Ю.С. Исследование воспроизведения бинарных изображений в процессах поэлементной записи // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 3. С. 22-33.

3. Азгальдов Г.Г. Практическая квалиметрия в системе качества: ошибки и заблуждения // Методы менеджмента качества. 2001. №3.

4. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D и 3D изображений: учебное пособие. СПб.: БХВ – Петербург, 2011. 608 с.

5. Лихачев В.В. Метрология и стандартизация. Квалиметрия печатного изображения: учебное пособие. М.: Изд–во МГУП «Мир книги», 1998. Часть 2. 47 с.

Зыкова Анна Витальевна, начальник отдела технического контроля, anna_novoselova@list.ru, Россия, Москва, Московская печатная фабрика – филиал акционерного общества «Гознак»,

Пухова Екатерина Александровна, канд. техн. наук, доцент, ea.puhova@mail.ru, Россия, Москва, Московский политех

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR EVALUATING THE QUALITY OF IMAGES OBTAINED BY LASER ENGRAVING ON A MULTILAYER POLYCARBONATE MATERIAL

A.V. Zykova, E.A. Pukhova

The article presents a method for evaluating the quality of reproduction of visual information - portrait photos intended for visual identification of an individual in the production of identification documents made on a multilayer polycarbonate material.

Key words: identification document, polycarbonate material, laser-active layer, personalization, laser engraving, image quality.

Zykova Anna Vital'evna, head of technical control department, anna_novoselova@list.ru, Russia, Moscow, Moscow printing factory – a branch of joint stock company «Goznak»,

Pukhova Ekaterina Aleksandrovna, candidate of technical sciences, docent, ea.puhova@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow polytech

УДК 622.692.4.053

АЛГОРИТМ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ РАЦИОНАЛЬНЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУЩЕСТВУЮЩЕГО НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЙ

М.И. Кононова

Важной задачей при изменении объема перекачки является определение эффективности работы насосного оборудования. В данной работе рассмотрен способ определения эффективности эксплуатации магистральных нефтепроводов рациональным использованием насосного оборудования, имеющегося на нефтеперекачивающих станциях.

Ключевые слова: нефтепродукты, энергоэффективность, насос, загрузка нефтепровода, КПД.

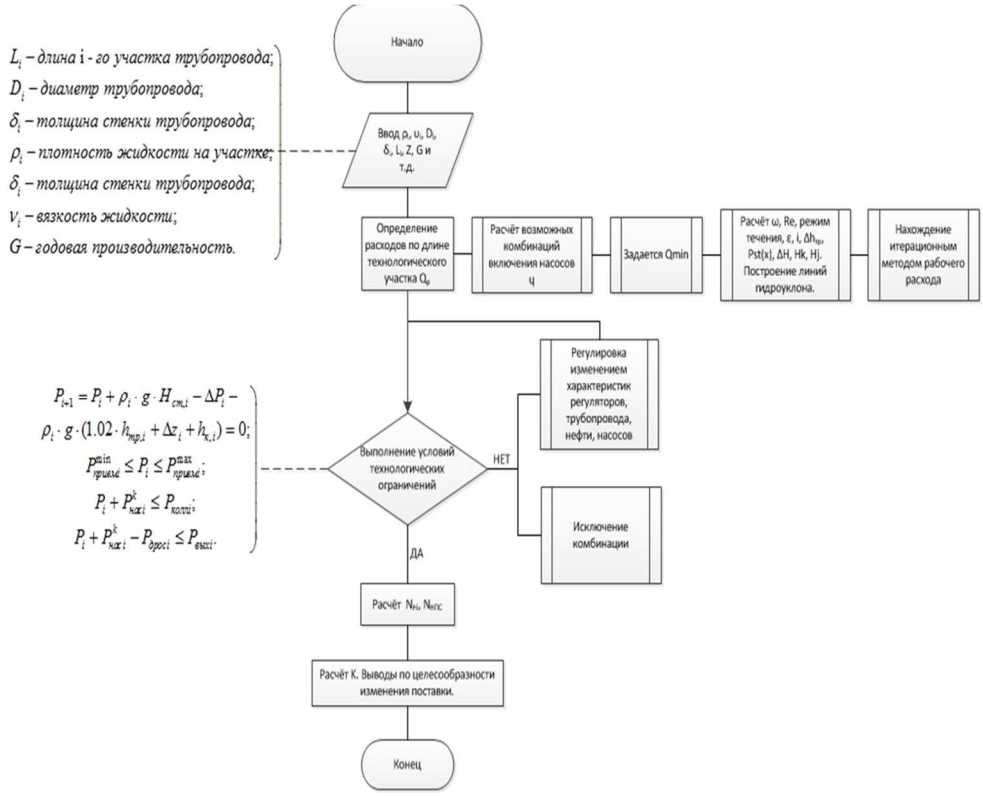
Важнейшей составляющей оценки эффективности эксплуатации магистральных нефтепроводов является рациональное использование насосного оборудования перекачивающих станций. Насосное оборудование, имеющееся на перекачивающих станциях, рассчитано на проектные производительности и недостаточно эффективно работает с расходами, отличными от проектных [1 - 3]. В связи с этим остро стоит вопрос об оценке эффективности использования насосного оборудования при изменении производительностей перекачки. Воспользовавшись ранее выполненными исследованиями [4 - 8] можно сделать заключение об отсутствии обобщенного показателя оценки эффективности эксплуатации имеющегося насосного оборудования в целом на текущий момент и для планируемого периода поставки. Отсутствие показателя усложняет планирование и контроль перекачки, может приводить к нерациональным действиям, перерасходу электроэнергии. В связи с этим предлагается применять обобщенный показатель эффективности использования насосного оборудования.

Для определения обобщенного показателя эффективности использования насосного оборудования предлагается методика, блок схема полученного алгоритма, которой представлена на рис. 1.

Данный алгоритм состоит из ввода основных данных, процессов, подпроцессов и решений.

Данный алгоритм сводится к определению наиболее эффективного режима транспортировки, который определяется исходя из нахождения показателя эффективности эксплуатации магистральных нефтепроводов рациональным использованием существующего насосного оборудования перекачивающих станций.

Описание алгоритма определения эффективности эксплуатации магистральных нефтепроводов (рисунок).



Блок-схема алгоритма определения эффективности эксплуатации магистральных нефтепроводов

Шаг 1. Задаются исходные данные для расчёта. Задается распределение производительности перекачки с учетом подкачек и откачек нефти.

Шаг 2. Перебираются все возможные комбинации включения насосного оборудования на НПС. Для каждой комбинации производится гидравлический расчёт и итеративно подбирается рабочий расход режима.

Шаг 3. Анализируется каждый режим работы по технологическим допущениям. Если режим недопустим, то производится исключение этого режима, либо его регулировка. Таким образом, получаем множество допустимых режимов, обеспечивающих заданное распределение производительности по трассе нефтепровода.

Шаг 4. Для каждого режима из множества режимов вычисляются значения суммарная электрическая и гидравлическая мощности.

Шаг 5. Производится расчёт обобщенного показателя эффективности использования насосного оборудования для технологического участка нефтепровода. Делается вывод по целесообразности изменения поставки.

Применение разработанной методики определения эффективности использования насосного оборудования позволяет оценить и спрогнозировать работу магистральных нефтепроводов на существующих режимах при различных уровнях загрузки и неравномерности перекачки нефти, выбрать наиболее эффективные стратегии перекачки, сравнить по качеству эксплуатации насосного оборудования разные НПС и различные нефтепроводы, оценить эффективность мероприятий по энергосбережению.

Полученная методика позволяет принимать решения о необходимости и целесообразности мероприятий, направленных на выполнения государственных программ энергосбережения и повышения эффективности использования насосного оборудования.

Список литературы

1. Мызников М.О., Гильдебрандт М.И. Эффективность работы магистральных насосов в условиях неполной загрузки нефтепроводов // Трубопроводный транспорт - 2018. Уфа, 2018. С. 351-353.

2. Шалай В.В., Мызников М.О., Кононова М.И. Пути повышения эффективности эксплуатации нефтепроводов // Нефтегазовый терминал. 2019. № 16. С. 315–319.

3. Мызников М.О. Оптимизация режимов и энергоресурсосбережение при транспортировке углеводородов // Neftegaz.RU. 2017. №12. С. 52-57.

4. Гольянов А.И., Нечваль А.М., Михайлов А.В. Выбор рационального режима работы магистрального нефтепровода при заданном плане перекачки нефти // Проблемы нефтегазового комплекса России: тез. докл. Междунар. конф. Секция «Транспорт и хранение нефти и газа». Уфа, 1998. С. 28-29.

5. Гольянов А.И., Гольянов А.А., Кутуков С.Е. Обзор методов оценки энергоэффективности магистральных нефтепроводов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов, 2017. 4 (110). С. 156-170.

6. Павлов В.В., Матвеев Г.Н., Беккер Л.М., Штукатуров К.Ю. Повышение эффективности работы трубопровода при последовательной перекачке нефти и нефтепродуктов // Наука и технология трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2015. № 2 (18). С. 26-35.

7. Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» // Российская газета. 27 ноября 2009. Федеральный выпуск № 5050 (226).

8. Ревель-Муроз П.А. Разработка методов повышения энергоэффективности нефтепроводного транспорта с внедрением комплекса энергосберегающих технологий: автореф. дис.... канд. тех. наук: 25.00.19. Уфа, 2018. С. 47-84.

Кононова Маргарита Иванона, аспирант, rita.kononova.94@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

ALGORITHM FOR THE METHOD OF DETERMINING THE EFFICIENCY OF OPERATION OF MAIN OIL PIPELINES WITH THE RATIONAL USE OF THE EXISTING PUMPING EQUIPMENT OF THE PUMPING STATIONS

M.I. Kononova

Important when changing the pumping volume is to determine the efficiency of the pumping equipment. In this paper, we consider a method for determining the operational efficiency of main oil pipelines that are used at oil pumping stations.

Key words: oil products, energy efficiency, pump, loading of the pipeline, efficiency.

Kononova Margarita Ivanona, postgraduate, rita.kononova.94@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 62-1/-9

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИИ ПЕЧАТНОГО ЦИЛИНДРА

Л.Б. Серкова, Л.Г. Варепо

Качество печатной продукции во многом зависит от соблюдения технологии печати. Так, например, важной характеристикой является создание необходимого давления печати. В свою очередь вал, воспринимающий данную нагрузку, не должен допускать деформации превышающие установленные нормы, при этом конструкция вала должна быть оптимальной. Компьютерное моделирование в данном случае помогает изучить влияние нагрузок на деформационные характеристики конструкции и выбрать наиболее оптимальный вариант.

Ключевые слова: моделирование, печатный цилиндр, деформация, рубашка печатного цилиндра.

Применение методов компьютерного моделирования и процессов автоматизации в настоящее время широко распространено для изучения различных процессов, такие методы также успешно применяются в полиграфии. Так, например, автоматизируют процессы обработки информации об изображении, этот процесс обычно является утомительным и трудоёмким [1, 2]. Применение компьютерных технологий позволяет во многом сократить временные затраты на проведение исследования, а также в какой-то степени уменьшить погрешность и частично исключить субъективность при проведении исследования.

Компьютерное моделирование занимает устойчивое положение среди современных методов исследования. Использование таких систем применяется в различных отраслях промышленности. В общем виде, данный процесс можно представить в следующем виде (рис. 1).

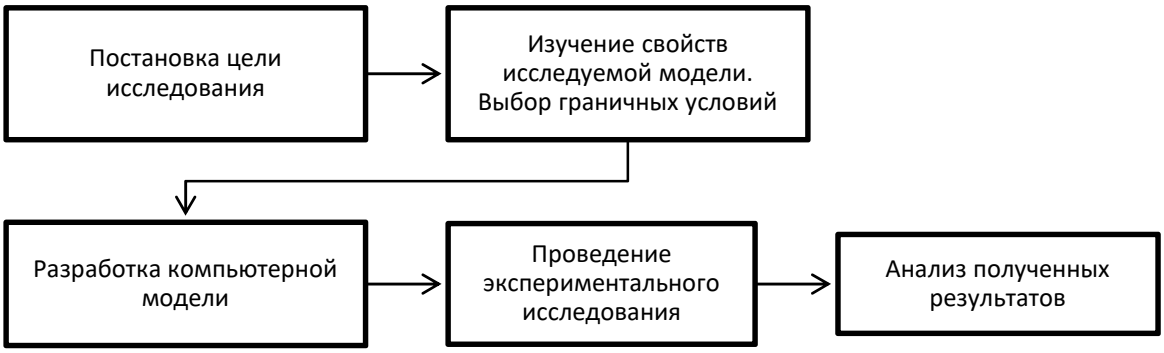


Рис. 1. Процесс компьютерного моделирования

В случае если анализ полученных данных не дал необходимого результата, необходимо вернуться к постановке цели и выполнить все этапы повторно.

Изучение характеристик модели при ее нагружении возможно с использованием метода конечных элементов (МКЭ) - это метод приближенного численного анализа [3]. К основным достоинствам данного метода можно отнести следующее:

с помощью МКЭ можно изучать различные по форме и материалу модели, имеющие различные свойства;

данный метод позволяет решать стационарные и нестационарные задачи;

возможно задавать любые свойства и граничные условия;

на одной и той же модели возможно провести различные исследования.

Метод конечных элементов можно представить следующим образом [4]: созданная модель разбивается на небольшие области, которые называются конечными элементами, форма и габаритные размеры их могут быть выбраны с помощью программы, однако разбивается модель наиболее оптимальным образом; в каждом элементе рассматриваются перемещения и нагрузки; взаимосвязь всех элементов осуществляется с помощью узловых точек; описание происходящих процессов в модели сводится к системе алгебраических уравнений, которые в свою очередь приводят к решению поставленной задачи.

Форма конечных элементов [5] может быть в виде тетраэдра, параллелепипеда, призмы. В разрабатываемой модели использовалась форма тетраэдра с 4-мя узлами, что является наиболее простым элементом (рис. 2).

Узловые перемещения в данном случае можно представить в следующем виде:

$$\{q\}_i = \left\{\{q\}_i^{(1)}\{q\}_i^{(2)}\{q\}_i^{(3)}\{q\}_i^{(4)}\right\}$$

где $\{q\}_i^{(k)} = \left\{\{q\}_1^{(k)}\{q\}_2^{(k)}\{q\}_3^{(k)}\right\}$.

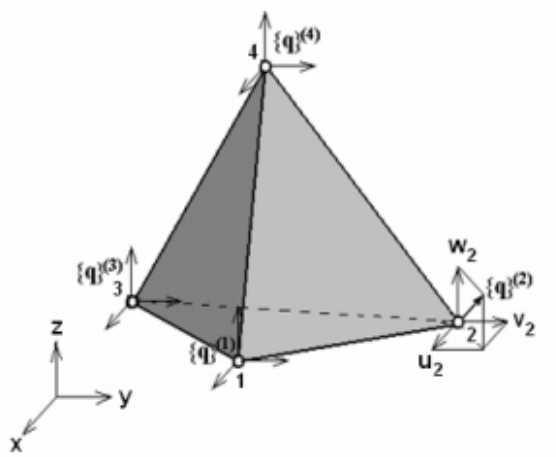


Рис. 2. Конечный элемент в форме тетраэдра

Разработка экспериментальной компьютерной модели позволяет во многом сократить временные затраты на проведение исследования и рассмотреть наиболее сложные процессы.

Целью работы является исследование деформационных характеристик конструкции печатного цилиндра.

Для изучения были созданы трёхмерные модели трех видов, габаритными размерами которых являются:

общая длина (включая цапфы) 950 мм;

длина цилиндра 750 мм;

диаметр цилиндра 220 мм;

диаметр цапф 40 мм;

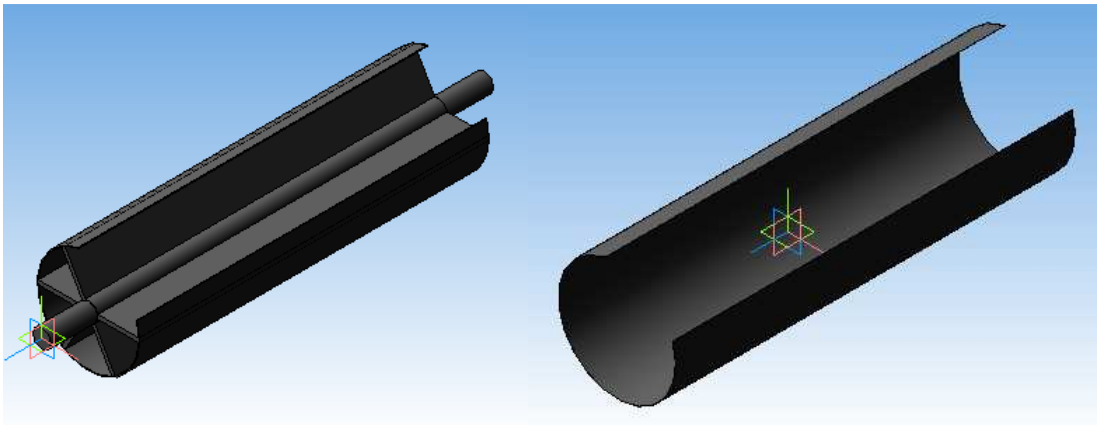
толщина рубашки печатного цилиндра 0,3 мм.

Модель представляет собой конструкцию из двух сопряженных деталей (рис. 3). Материалы рубашек выбраны следующие:

модель 1. Сталь;

модель 2. Латунь;

модель 3. Алюминий.



а ***б***

Рис. 3. Детали конструкции: а - конструкция печатного цилиндра; б - конструкция рубашки

Материал цилиндра - сталь 30 [6], нелегированная конструкционная специальная сталь, качественная углеродистая сталь, используемая при изготовлении деталей невысокой прочности, таких как тяги, рычаги, звездочки, валы и прочее. Характеристики материалов рубашек представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сталь 30. Характеристики

Показатель	Значение		
	Модель 1	Модель 2	Модель 3
Предел текучести [МПа]	460	520	235
Модуль упругости нормальный [МПа]	210000	105000	75000
Коэффициент Пуассона	0.3	0.37	0.3
Плотность [кг/м^3]	7850	8800	2470
Температурный коэффициент линейного расширения [1/C]	0.000012	0.000019	0.000022
Теплопроводность [Вт/(м*C)]	49	142.35	80
Предел прочности при сжатии [МПа]	600	410	410
Предел выносливости при растяжении [МПа]	294	209	209
Предел выносливости при кручении [МПа]	150	139	139

Нагрузки, прикладываемые к цилиндру должны соответствовать давлению печати. Ранее выполненными исследованиями были рассмотрены эти значения [7, 8]. Принимаем значение нагрузки равное 4 кН, для печати с помощью офсетных машин, при этом допустимые деформации не должны превышать 0,01 … 0,02 мм, согласно [9]. Расчёт выполнен с помощью системы прочностного анализа APM FEM для КОМПАС-3D.

В табл. 2 представлены характеристики нагружения печатного цилиндра по линии.

Таблица 2

Информация о нагрузках

Наименование	Выбранные объекты	Параметры нагрузки
Распределённая сила: 2	Рёбра: 1	Вектор силы: X = 1368.08; Y = -3758.76; Z = 0 Величина: 3999.989953 Н

Расчет выполняется с помощью метода конечных элементов, характеристики разбиения для моделей выбраны одинаковые и представлены в табл. 3.

На рис. 4 представлены конечно-элементная сетка моделей и направление нагрузки.

Массы моделей соответственно равны 38,77, 38,88, 38,13 кг.

Рассмотрим суммарные линейные перемещения под действием нагрузки (рис. 5-7).

Таблица 3

Параметры и результаты разбиения

Наименование	Значение		
	Модель 1	**Модель 2**	**Модель 3**
Максимальная длина стороны элемента [мм]	5	5	5
Максимальный коэффициент сгущения на поверхности	1	1	1
Коэффициент разрежения в объеме	1.5	1.5	1.5
Количество конечных элементов	409812	409812	409812
Количество узлов	127934	127934	127934

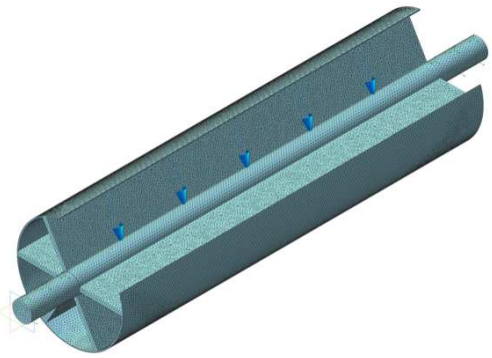


Рис. 4. Конечно-элементные сетки моделей

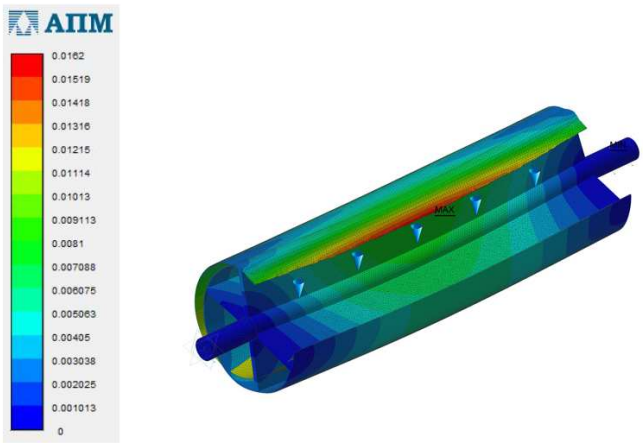


Рис. 5. Суммарные линейные перемещения. Модель 1

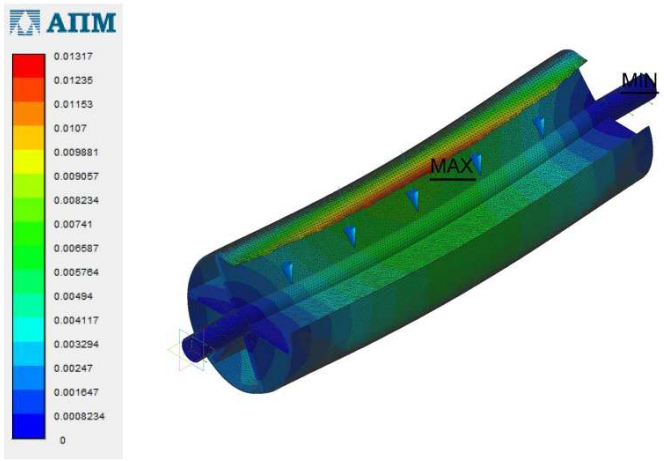


Рис. 6. Суммарные линейные перемещения. Модель 2

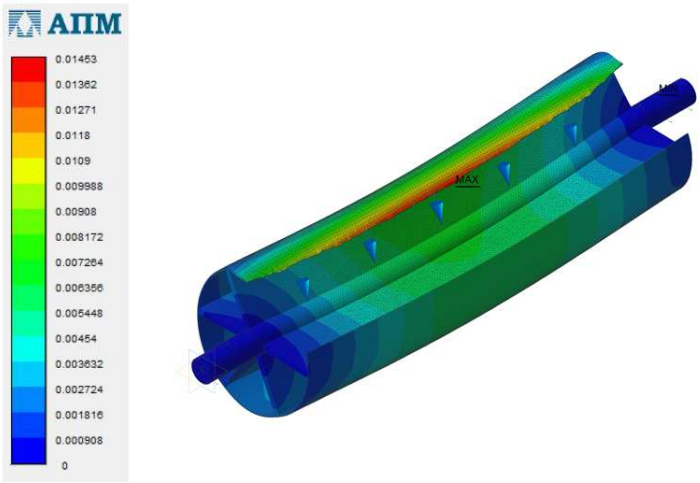


Рис. 7. Суммарные линейные перемещения. Модель 3

Исходя из проделанной работы, можно сделать следующие выводы:

согласно полученным результатам максимальные деформации равны для первой модели 0,0162 мм, для второй – 0,0132, а для третьей – 0,0145. Таким образом, минимальные нагрузки испытывает модель с рубашкой из латуни, хотя в общем значения максимальных нагрузок схожи для всех трех моделей;

при этом масса образца с латунью является самой высокой и больше минимально полученного значения на 750 грамм (масса конструкции с алюминием).

В качестве дальнейшей работы предполагается изучить влияние количества ребер жесткости и их толщины на деформацию конструкции, а также влияние точки приложения силы.

Список литературы

1. Lundström J., Verikas A. Assessing print quality by machine in offset colour printing // Knowledge-Based Systems. Vol. 37, 2013, P. 70-79.

2. Verikas A., Lundström J., Bacauskiene M., Gelzinis A. Advances in computational intelligence-based print quality assessment and control in offset colour printing // Expert Systems with Applications. Vol. 38, 2011. P. 13441-13447.

3. Фокин В.Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твёрдого тела: учебное пособие. Самара: Самарский государственный технический университет, 2010. 131 с.

4. Маковкин Г.А., Лихачева С.Ю. Применение МКЭ к решению задач механики деформируемого твердого тела: учебное пособие. Н.Новгород: Изд-во ННГАСУ, 2012. Часть 1. 71 с.

5. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики. Библиотека журнала «Світ геотехніки». ООО «ИПО «Запорожье», 2009. 9-й выпуск. 400 с.

6. ГОСТ 1050-2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия (с Поправкой). М.: Стандартинформ, 2014. 36 с.

7. Матар Таан Фархан Обоснование требований к точности изготовления составных частей печатного аппарата офсетных машин: дис. ... кандидата технических наук: 05.02.02. М.: МГУП, 1997. 182 с.

8. Семенов А.А. Моделирование деформаций печатного цилиндра машины формата А1 // Вестник Московского государственного университета печати. 2012. С. 94-96.

9. Суслов М.В. Оценка влияния элементов конструкции на деформации цилиндров печатной пары: дис. ... кандидата технических наук: 05.02.13. М.: МГУП, 2010. 98 с.

Серкова Любовь Борисовна, ассистент, lyubov_borisovna_omgtu@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Варепо Лариса Григорьевна, д-р техн. наук, профессор, larisavarepo@yandex.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

REVISITING OF THE PRINTING CYLINDER DEFORMATION PARAMETERS

L.B. Serkova, L.G. Varepo

The printed products quality depends on set of parameters including pressure value correctness in a nip zone. Provided that loaded printing cylinder should resist extremal deformation, cylinder parameters demand high accuracy construction providing. Simulation modelling can test loading effect on deformation parameters resulting in optimal construction selection.

Key words: modeling, printing cylinder, deformation, printing cylinder shirt.

Serkova Lyubov Borisovna, assistant, lyubov_borisovna_omgtu@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Varepo Larisa Grigoryevna, doctor of technical sciences, professor, larisavarepo@yandex.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 62-83

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГУЛИРУЕМОГО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНОГО АГРЕГАТА В СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖАНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

А.А. Коржев, И.Н. Войтюк, А.И. Смирнов,
Д.И. Иванченко, Э.В. Яковлева

В статье представлено описание метода регулирования подачи воды при поддержании пластового давления за счет изменения скорости вращения синхронного электропривода насосного агрегата, компьютерной модели системы регулируемого привода на основе высоковольтного синхронного электропривода и каскадного преобразователя частоты, приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: насосный агрегат, регулируемый электропривод, синхронный двигатель, каскадный преобразователь частоты.

При добыче нефти в настоящее время используют автоматизированные системы поддержания пластового давления. Регулирование пластового давления в них осуществляется за счет закачки в пласт воды. Вода подаётся в пласт с помощью блочных кустовых насосных станций, которые оснащаются синхронными и асинхронными электродвигателями большой мощности. Последние, как правило, получают питание непосредственно от высоковольтной сети 6 или 10 кВ. Несмотря на ряд преимуществ синхронных электродвигателей, регулирование скорости их вращения до недавнего времени представляло собой ряд сложностей. В этой связи обычно подачу воды регулируют методом дросселирования или байпасирования, которые являются весьма неэкономичными. В данной работе рассматривается компьютерная модель системы регулируемого привода на основе высоковольтного синхронного электропривода и полупроводникового преобразователя частоты.

1. Анализ объекта моделирования. В качестве объекта моделирования рассмотрим электропривод насосного агрегата ЦНС-120-1775-3Т-М с номинальной производительностью 120 м3/ч и с напором 1775 м. Данный насосный агрегат приводится в действие синхронным электродвигателем типа СТДМ-1600-2РУХЛ4 мощностью 1600 кВт с номинальной скоростью вращения 3000 об/мин. Питание двигателя осуществляется непосредственно от сети 6 кВ, 50 Гц. В настоящее время скорость электропривода не регулируется, пуск производится в асинхронном режиме с последующей подачей напряжения в обмотку возбуждения при достижении приводом подсинхронной скорости. Управление возбуждением двигателя осуществляется с помощью статического тиристорного возбудителя типа ВТЕ 10-315/150-02-УХЛ4 с цифровой системой управления. Регулирование давления в пласте осуществляется с помощью дросселирования потока задвижкой, установленной на нагнетательном трубопроводе. Известно, что данный способ регулирования весьма не экономичен, причем, чем шире диапазон регулирования скорости, тем больше потери энергии.

Существуют различные варианты реализации полупроводниковых преобразователей, применимых в данном случае [1]. В частности, встречаются двухтрансформаторные преобразователи на основе инверторов тока, например, отечественные преобразователи серии ПЧИТ, структура которых соответствует приведенной на рис. 1. Недостаток такой схемы — высокая стоимость и габариты фильтрующих элементов и трансформатора, особенно установленного на выходе инвертора, ограниченный диапазон регулирования скорости из-за того, что выходной трансформатор способен преобразовывать напряжение лишь до определенного значения частоты, низкий коэффициент полезного действия из-за многократного преобразования энергии. Преимущество — относительная простота и дешевизна полупроводникового преобразователя.

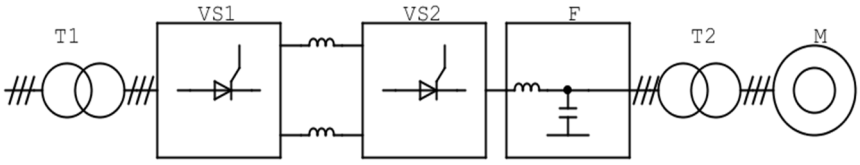


Рис. 1. Преобразователь частоты по двухтрансформаторной схеме: T1 – понижающий трансформатор; VS1 – управляемый выпрямитель; VS2 – автономный инвертор тока; F – синусный фильтр; T2 – повышающий трансформатор; M – двигатель

Другим вариантом преобразователя являются преобразователи по схеме 12-пульсный выпрямитель — трёхуровневый автономный инвертор напряжения на основе запираемых тиристоров, например, преобразователи частоты серии Sinamics фирмы Siemens (рис. 2). К преимуществу таких преобразователей относятся сравнительная простота и надежность схемы, обусловленная применением силовых тиристоров. Недостаток — несинусоидальность выходных токов, обусловленная сравнительно низкой частотой коммутации тиристоров, как правило, не выше единиц кГц.

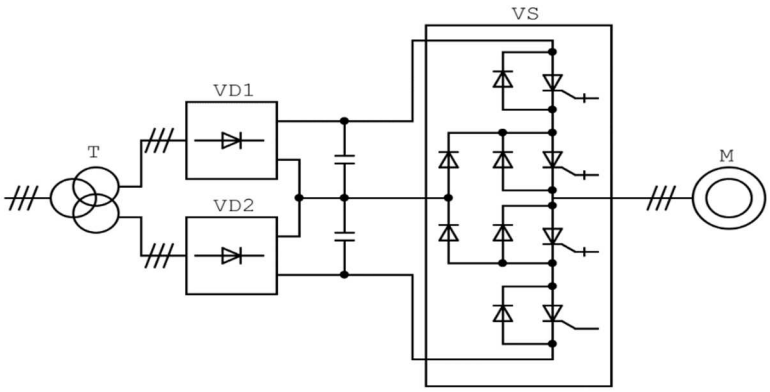


Рис. 2. Высоковольтный преобразователь частоты серии Sinamics: T – трансформатора; VD1, VD2 – трёхфазные неуправляемые выпрямители; VS – трехуровневый автономный инвертор напряжения на основе запираемых тиристоров; M – двигатель

Наиболее совершенными являются преобразователи частоты по схеме каскадных преобразователей частоты, примером которых являются преобразователи типа Perfect Harmony Siemens. Преимущество таких преобразователей – синусоидальность выходных токов, обусловленная высокой частотой коммутации низковольтных транзисторов или тиристоров ячеек и многоуровневой системой формирования токов при последовательном соединении преобразовательных ячеек. Недостаток таких преобразователей — сравнительно высокая стоимость и сложность системы управления. Принцип работы экспериментальной установки представлен на рис. 3.

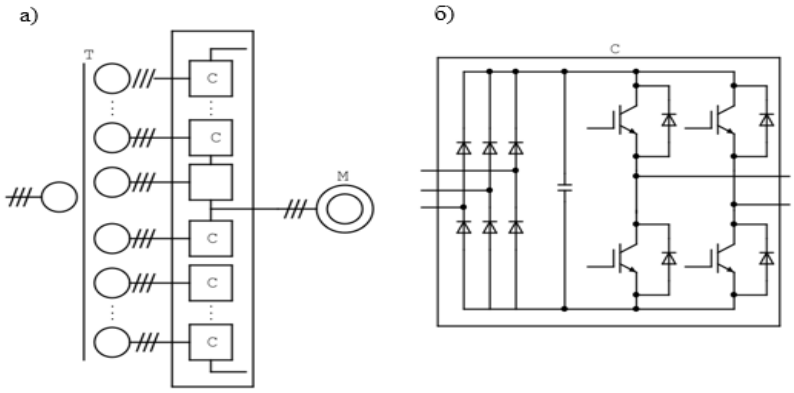


Рис. 3. Преобразователь по схеме каскадного преобразователя частоты серии Perfect Harmony: а – структура преобразователя; Т – многообмоточный трансформатор; С – преобразующие ячейки; б – схема отдельной преобразующей ячейки

2. Результаты моделирования. Анализируя преимущества и недостатки рассмотренных преобразователей, наиболее рациональным для рассматриваемой системы электропривода можно считать третий вариант, т. е. вариант каскадного преобразователя.

Модель синхронного двигателя, с учетом ряда допущений, может быть представлена следующей системой уравнений в форме Коша [2, 3]. Уравнения записаны во вращающейся системе координат d-q, ориентированной по полю ротора.

Уравнение ЭДС обмотки статора по оси d

$$L_d \frac{di_d}{dt} = U_d - R_s i_d + \omega L_q i_q, \quad (1)$$

где U_d- составляющая напряжения статора по оси d, В;L_d, L_q- индуктивность обмотки ротора по оси d, q, Гн;i_d, i_q- составляющая тока статора по оси d, А;R_s- активное сопротивление обмотки статора, Ом; ω - скорость вращения ротора, рад/с.

Уравнение ЭДС обмотки статора по оси q

$$L_q \frac{di_q}{dt} = U_d - R_s i_q - \omega L_q i_q - \psi_r \omega, \quad (2)$$

где U_q- составляющая напряжения статора по оси q, В;ψ_r- поток возбуждения, Вб.

Уравнение ЭДС обмотки ротора

$$L_r \frac{di_r}{dt} = U_r - R_r i_r, \tag{3}$$

где U_r- напряжение возбуждения, L_r- индуктивность обмотки возбуждения, Гн; R_r- активное сопротивление обмотки ротора, Ом; i_r- ток возбуждения, А.

Выражение для вращающего момента

$$M = \frac{3}{2} p\left[\psi_r i_q - \left(L_d - L_q\right) i_d i_q\right], \tag{4}$$

где p – число пар полюсов.

Уравнение для механической части привода

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \tag{5}$$

где J – приведенный момент инерции ротора, кг · м^2, M_c – момент сопротивления движению.

Следует учесть, что приведенная система уравнений (1)-(5) не учитывает наличия демпферных обмоток, а также предполагает установившееся значение магнитного потока, создаваемого обмоткой возбуждения, и не учитывает влияние на него со стороны обмоток ротора. Данные допущения, по мнению авторов, можно считать несущественными для приводов с частотным управлением.

Модель, соответствующая уравнениям (1) - (5) и реализованная в системе графического моделирования xcos, встроенной в систему scilab, имеет вид

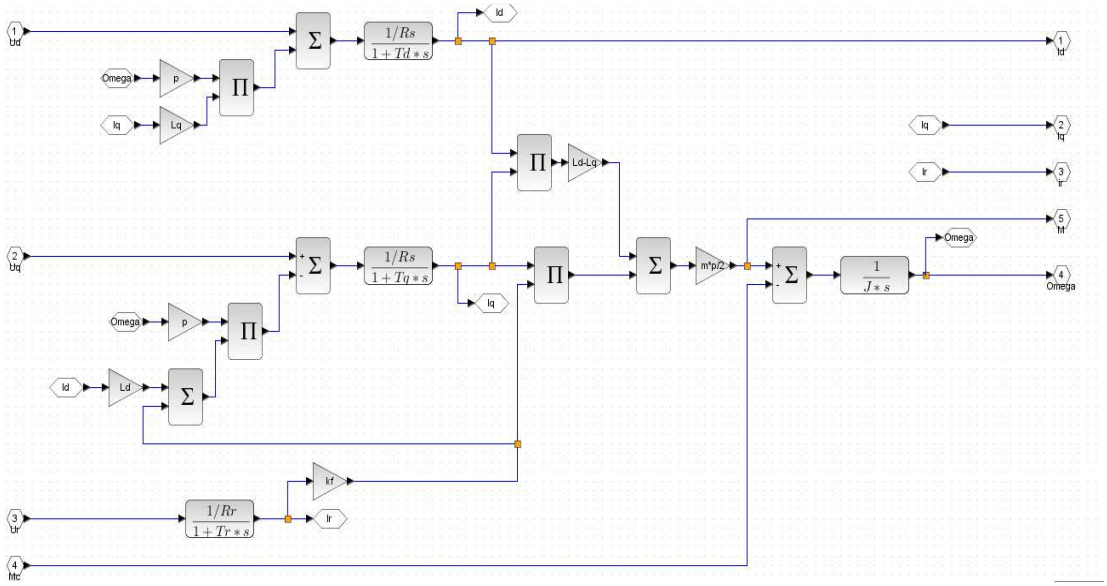


Рис. 4. Модель синхронного двигателя

Учитывая малость времени переходных процессов в преобразователе частоты в сравнении с электрическими и механическими постоянными времени двигателя и насосного агрегата, а также с учетом того, что ток каскадного преобразователя частоты практически синусоидальный, при моделировании была использована его упрощенная линеаризованная модель (рис. 5).



Рис. 5. Модель синхронного двигателя

Система управления электроприводом содержит следующие регуляторы (рис. 6), сверху вниз: регулятор тока намагничивающей составляющей тока статора, имеющий нулевое задание, т. к. возбуждение двигателя осуществляется независимой обмоткой на роторе, контур регулирования скорости с подчиненным ему контуром моментообразующей составляющей тока статора и контур регулирования потока возбуждения. Регуляторы тока настроены на технический, а регуляторы скорости и потока — на симметричный оптимум согласно известным методам.

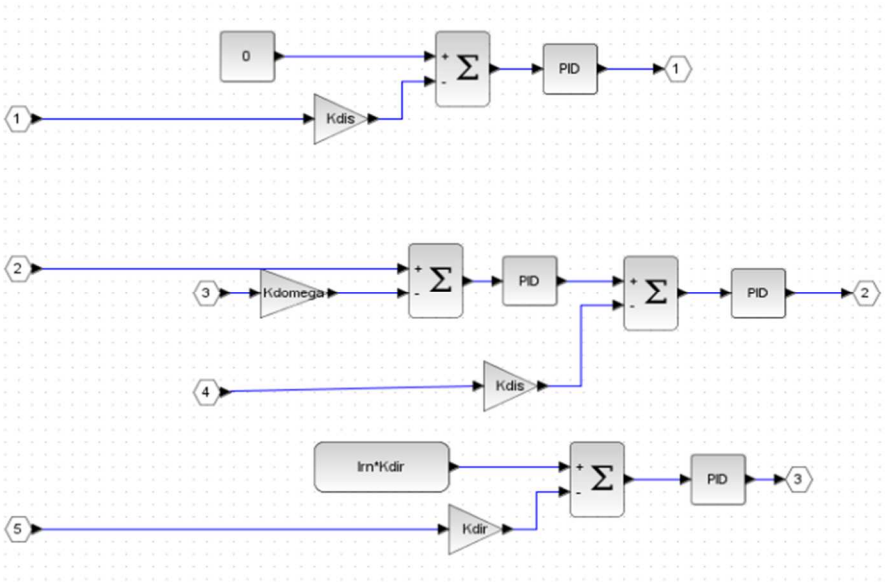


Рис. 6. Блок регуляторов

Модель нагрузки, в соответствии с законами подобия для центробежных машин, представляет собой квадратичную зависимость момента, создаваемого центробежной машиной, от скорости и квадратичной же зависимости давления в нагнетательном трубопроводе от скорости.

$$M_c = K_1\omega^2, \quad (6)$$

$$K_1 = M_{\text{ном}}/\omega_{\text{ном}}^2, \quad (7)$$

$$p = K_2\omega^2, \quad (6)$$

$$K_2 = p_{\text{ном}}/\omega_{\text{ном}}^2, \quad (7)$$

где $M_{\text{ном}}$, $\omega_{\text{ном}}$, $p_{\text{ном}}$- номинальные значения, соответственно, момента ($\text{Н} \cdot \text{м}$), скорости вращения ротора ($\text{рад} \cdot \text{с}$) и давления (Па).

Коэффициенты пропорциональности в этих уравнениях зависят от состояния задвижки и эквивалентного гидравлического сопротивления трубопровода и пласта и, при моделировании, меняются скачкообразно.

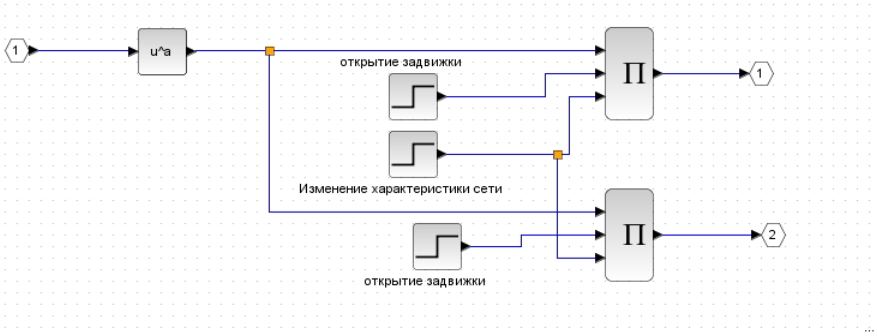


Рис. 7. Модель насосного агрегата

Общая модель электропривода, включающая ранее описанные блоки, приведена на рис. 8. Кроме этих блоков модель содержит регулятор давления в трубопроводе, настроенный на симметричный оптимум, и блоки управления работой регуляторов. Согласно принятому алгоритму, сначала происходит плавный разгон привода до номинальной скорости при отключенном регуляторе давления и закрытой задвижке на нагнетательном трубопроводе. Затем, происходит открытие задвижки. И лишь после этого в работу включается регулятор давления. Выбор такого алгоритма пуска вызван тем, что при отключенном насосе в пласте присутствует существенное остаточное давление жидкости, и включение в работу регулятора до выхода привода на номинальный режим работы могло бы привести к возникновению аварийного режима работы насоса.

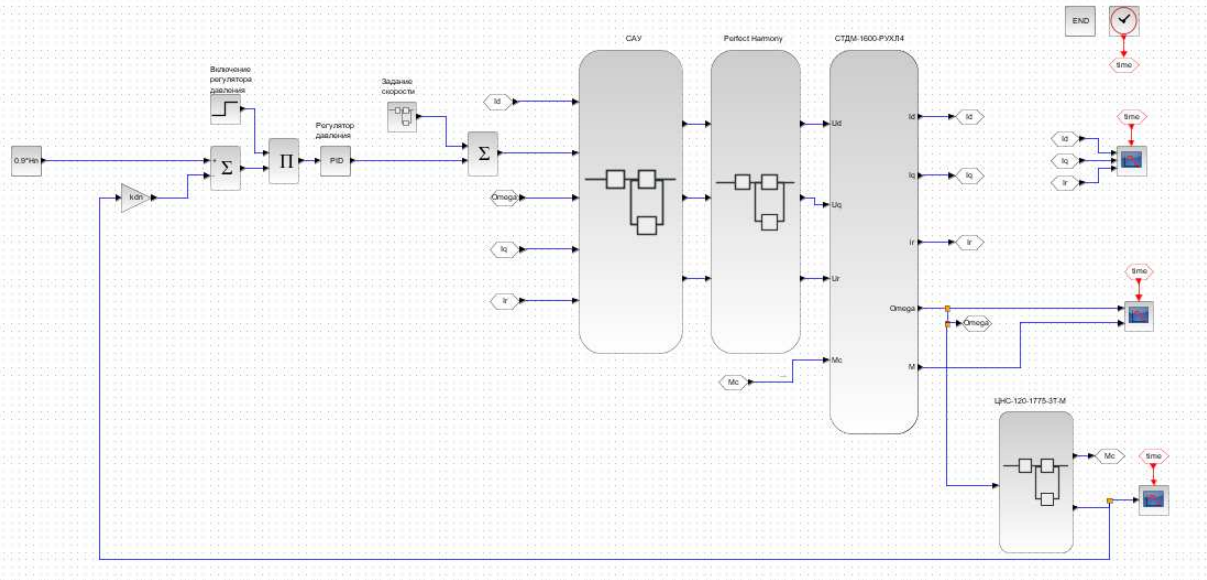


Рис. 8. Модель системы регулируемого привода

На рис. 9. представлены результаты моделирования.

Заключение. В первые 3 секунды происходит плавный разгон двигателя до номинальной скорости вращения при закрытой задвижке. На 6 секунде происходит открытие задвижки, в результате чего нагрузка на привод возрастает, а скорость остаётся неизменной. Регулятор давления на этом этапе остаётся отключен, а система регулирования по давлению —

разомкнутой. В момент 9,25 с включается в работу система регулирования давления и скорость вращения снижается. Давление при этом уменьшается до заданного значения. В момент 12,5 с происходит изменение задания для привода, что приводит к ещё большему снижению скорости и, соответственно, давления в трубопроводе.

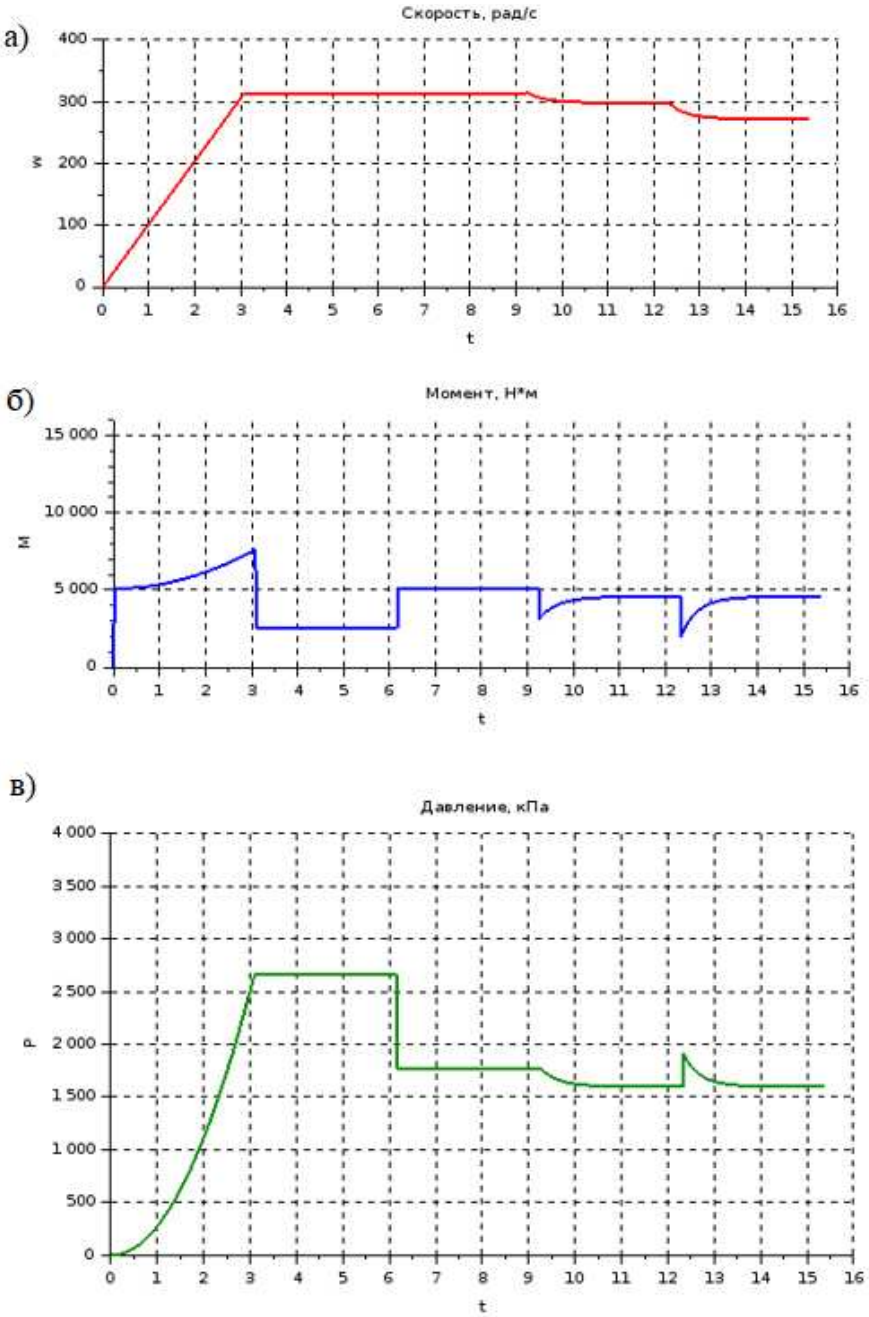


Рис. 9. Диаграммы изменения: а – скорости; б – момента; в – давления в трубопроводе

Из графиков видно, что расчёт регуляторов выполнен верно, а предлагаемая компьютерная модель электропривода адекватно выполняет моделирование работы системы регулируемого электропривода насосного агрегата.

Список литературы

1. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет); под ред. Крутякова Е.А. СПб.: Электросила, 2003. 172 с.

2. Абрамович Б.Н. Жуковский Ю.Л., Устинов Д.А., Круглый А.А. Моделирование электромеханических комплексов с синхронными двигателями. Нестор, 2007. 6 с.

3. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. КОРОНА-Век, 2008. 368 с.

Коржев Александр Александрович, канд. техн. наук, доцент, kaa1024@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный университет,

Войтюк Ирина Николаевна, канд. техн. наук, доцент, voytuk_irina@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный университет,

Артем Иванович Смирнов, студент, smiartem@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный университет,

Иванченко Даниил Иванович, канд. техн. наук, доцент, dan87332@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный университет,

Яковлева Эмилия Владимировна, канд. техн. наук, доцент, em88mi@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный университет

MODELING OF A REGULATED SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF A PUMP UNIT IN A SYSTEM OF PRESSURE SUPPORT

A.A. Korzhev, O.M. Bolshunova, I.N. Voytyuk, E.V. Iakovleva, A.V. Kagan

The article describes the method of regulating the water supply while maintaining reservoir pressure by changing the rotation speed of the synchronous electric drive of the pumping unit, a computer model of the adjustable drive system based on a high-voltage synchronous electric drive and a cascade frequency converter, the simulation results are presented.

Key words: pumping unit, adjustable electric drive, synchronous motor, cascade frequency converter.

Korzhev Alexander Alexandrovich, candidate of technical sciences, docent, kaa1024@yandex.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University,

Voytyuk Irina Nikolaevna, candidate of technical sciences, docent, voytuk_irina@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University,

Smirnov Artem Ivanovich, student, smiartem@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University,

Ivanchenko Daniil Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, dan87332@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University,

Iakovleva Emiliia Vladimirovna, candidate of technical sciences, docent, em88mi@gmail.com, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University

УДК 541.64:539.3

МАКРОСТРУКТУРА АНИЗОТРОПНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК С «ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ»

А.П. Кондратов, Е.П. Черкасов, А.Н. Утехин

Методами термомеханического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии исследована пленка сополимера винилхлорида с винилацетатом, обладающая эффектом «памятью формы». Показано, что надмолекулярная структура поверхностного слоя пленки отличается от надмолекулярной структуры внутренних слоев. Установлено различие степени кристалличности внутреннего и поверхностного слоев и увеличение средней температуры плавления кристаллитов в направлении от центра к поверхности. Показано, что измельчение поверхностного слоя пленки приводит разрушению его макроструктуры, определяющей эффект выделения энергии из пленки при термостимулируемой усадке – восстановлении габаритных размеров («память формы»).

Ключевые слова: «память формы», сополимер винилхлорида и винилацетата, надмолекулярная структура полимера, дифференциально сканирующая калориметрия.

Полимерные волокна и пленки с «памятью формы» применяются в качестве биологически совместимых и безопасно разлагающихся в организме живых организмов, нитей, бинтов и пластырей [1, 2]. Трубчатые изделия с «памятью формы» используются в качестве стентов при сердечно-сосудистых операциях [3-6], что позволяет в минимально инвазивной хирургии [7] достигать труднодоступных областей организма человека или животного. В ортопедии такие материалы служат основой системы гибких бандажей [8], которые дополнительно обладают антибактериальной функцией [9], активизируемой при деформации после установки бандажа.

Отложенная по времени реализации деформация без увеличения объема полимерного тела проявляется в изменении двух или трех габаритных размеров изделия направлениях, при повышении или понижении температуры, изменении химического и фазового состава, окружающей среды или ее агрегатного состояния. Если деформация изделий из таких материалов ограничена конструктивно, например, при фиксации одного из габаритных размеров, то эффект «памяти формы» проявляется в возникновении значительных внутренних напряжений в материале [10], обуславливающих его растрескивание (образование микротрещин) [11], изменение прозрачности [12] или смещение спектра поглощения поляризованного света [13].

Различными инструментальными методами установлено что, при периодическом нагревании и охлаждении полимеров с «памятью формы» [14], надмолекулярная структура полимерного материала из неравновесного напряженно деформированного состояния поэтапно переходит в состояние, приближающееся к равновесию в изменившихся условиях.

Структура полимеров, обладающая эффектом «памяти формы» после холодной вытяжки фиксируется в пространстве, по меньшей мере, двумя видами взаимодействия макромолекул, один из которых в большей степени чувствителен к факторам среды (подвержен разрушающему действию). Наиболее устойчивы к действиям внешних факторов химические связи (сшивки) между макромолекулами полимера и узлы их механического сцепления. Менее устойчивы кристаллические образования и надмолекулярная структура ближнего порядка в аморфной части полимера. Причем факторы внешнего воздействия ослабляют один из видов межмолекулярного взаимодействия лишь в определенном интервале интенсивности, за пределами которого различие между силами межмолекулярного взаимодействия не определяет макроскопический эффект «памяти формы».

Схематично трансформация макромолекул, надмолекулярной структуры и фазового состава полимеров с «памятью формы» по мере увеличения температуры показана на примере химически сшитых кристаллизующихся каучуков (рис. 1).

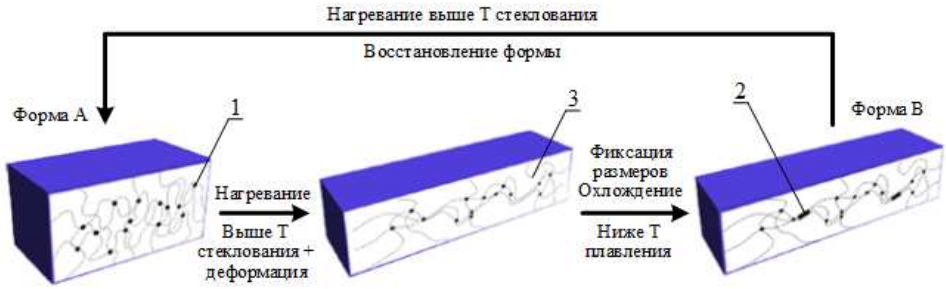


Рис. 1. Схема изменения надмолекулярной структуры полимера при получении изделий с «памятью формы» вытяжкой и охлаждением и при восстановлении формы после нагревания: 1 – химическое/механическое соединение макромолекул; 2 – кристаллические образования; 3 – макромолекулы [15]

Авторы работы [15] изобразили место химической сшивки или физического (механического) сцепления макромолекул точками (1), и место образования кристаллической фазы прямоугольниками (2). Места «жесткого» соединения макромолекул соединены гибкими цепями макромолекул в форме извилистых линий (3). При деформации извилистость линий уменьшается, что соответствует распрямлению цепей.

В работе [16] места жесткой связи макромолекул химической сшивкой дополнены петлями зацеплений и скользящими связями (рис. 2), которые образуют макроструктуру – напряженно-деформированную систему макромолекул всего полимерного тела (пленки, волокна), состоящую из множества ориентированных вдоль направления вытяжки «скользящих» и «подпружиненных» частей.

При вытяжке полимера расстояние между распрямляющимися цепями макромолекул уменьшается, число механических зацеплений и сила взаимного притяжения увеличиваются и на участках наибольшего сближения при понижении температуры появляются или дополнительно форми-

руются кристаллические образования, фиксирующие форму полимерного тела в напряжённо деформированном состоянии и макроструктуру механических связей в масштабе всего тела (пленки, волокна).

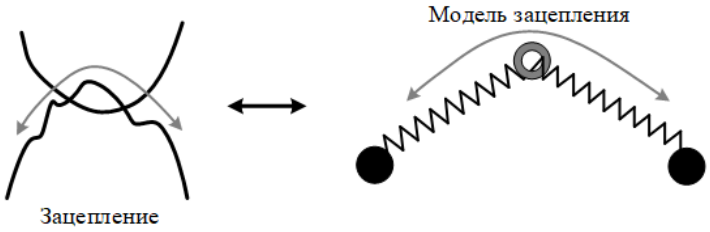


Рис. 2. Схемы петель механических зацеплений и скользящих связей макромолекул линейного карбоцепного полимера [16].

Схема реализации термомеханических свойств полимеров с «памятью формы», предложенная в [15], соответствует представлениям о надмолекулярной структуре и теплофизических свойствах таких аморфно-кристаллических термопластов как полиэтилентерефталат (ПЭТФ), поливинилиденфторид (ПВДФ), политрифторхлорэтилен (ПТФХЭ), сополимеры винилхлорида или винилацетата, сополимеры ПТФХЭ и ВДФ, температура стеклования которых превышает температуру эксплуатации на десятки градусов.

Для аморфных полимеров, таких как полистирол, и для аморфно-кристаллических полимеров с температурой стеклования ниже температуры эксплуатации, таких как полиэтилен и другие полиолефины, из которых также изготавливают изделия с «памятью формы», схема превращений надмолекулярной структуры может применятся лишь условно. Технологические стадии получения и условия восстановления формы изделий из этих полимеров совпадают со схемой, показанной на (рис.1), но либо температура вытяжки может быть существенно выше температуры стеклования аморфной части полимеров (полиэтилен), либо образование кристаллической фазы после вытяжки не происходит (полистирол). Рассмотрение механизмов получения изделий с «памятью формы» из аморфных стекол и кристаллизующихся эластомеров полимеров заслуживает специального исследования и отдельного рассмотрения.

Объектом настоящего исследования являлись термоусадочные пленки из сополимеров винилацетата и винилхлорида, температура стеклования которых выше температуры эксплуатации на 30-40ºС. Степень кристалличности ориентированных пленок из сополимеров винилхлорида менее ~1% [17].

Дисперсионное взаимодействие макромолекул сополимера в аморфной части анизотропных тел (волокон и пленок), существенно меньше, чем взаимодействие макромолекул в их фибриллизованной кристаллической части. При увеличении интенсивности электромагнитного излучения инфракрасного диапазона длин волн и повышении температуры окружающей среды и полимерного тела выше температуры стеклования аморфная часть пленок становится эластичной и не способна обеспечивать

сохранение формы волокна или пленки, достигнутой в результате вытяжки при низких температурах. Связь между макромолекулами, обусловливающая форму тел до деформации при низких температурах, обеспечивается химической сшивкой или механическими зацеплениями и взаимодействием внутри кристаллических формирований. Очевидно, что повышение температуры также несколько снижает силы взаимодействия внутри кристаллической фазы и это отражается на зависимости эффекта «памяти формы» от температуры [12]. Кристаллические образования различной величины имеют разную среднюю температуру плавления, зависящую от дефектности кристаллов и молекулярно-массового распределение макромолекул. По этой причине масштаб проявления эффекта «памяти формы» по силе и деформации зависит от величины и скорости внешнего воздействия на неравновесную напряженно-деформированную структуру полимера.

Роль сильного взаимодействия между линейными макромолекулами сополимеров винилхлорида и винилацетата, обеспечивающего устойчивость к внешнему воздействию и «память формы» выполняют узлы механического зацепления макромолекул. Известны оригинальные [18-21] и обзорные [22, 23] публикации, в которых предложены физические и математические модели для феноменологического описания и количественной оценки эффекта «памяти формы» различных по химическому составу и строению металлических, неметаллических и полимерных материалов. Наиболее адекватным для описания эффекта «памяти формы» в полимерах являются универсальные модели вязко-упругого тела [24], в которых упругие составляющие деформации изображаются в виде взаимосвязанных пружин различной жесткости, расположенных вдоль направления вытяжки полимера (рис. 3).

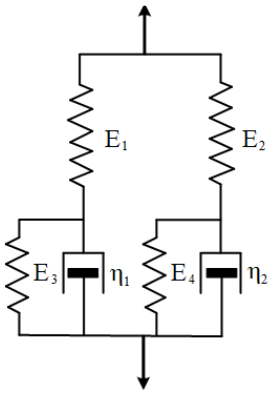


Рис. 3. Универсальная модель вязко-упругого тела [24]: E – модуль упругости; η – вязкость

В цитируемых нами публикациях макроскопические размеры (протяженность механических связей) вязко-упругих элементов вдоль направления ориентационной вытяжки полимеров, а также их распределение в поперечном направлении (по толщине пленок) не рассматривается. Роль макроструктуры полимерных тел, влияющей на эффект «памяти формы», не обсуждается и экспериментально не исследуется.

Цель работы - разработка методики экспериментальной оценки роли масштабного фактора в эффекте «памяти формы» и распределения вязко-упругих элементов надмолекулярной структуры аморфно-кристаллического полимера по толщине термоусадочных пленок.

Постановка задачи и пути решения. Методом ДСК оценить уровень внутренних напряжений и расположение кристаллической фазы в объеме термоусадочной пленки. Определить влияние термообработки пленки на уровень внутренних напряжений и степень кристалличности термоусадочной пленки.

Произвести механическое отделение и измельчение поверхностного слоя пленки сополимера винилхлорида и винилацетата путем препарирования и методом ДСК оценить уровень внутренних напряжений и степень кристалличности полимера в дисперсном состоянии (с разрушенной макроструктурой).

Объекты и методы исследования. В качестве изделия из полимерного материала с «памятью формы» использовали термоусадочную пленку «*PVC LF-T147/07 T25*» толщиной 40 мкм производства фирмы «*KlocknerPentaplast*» (Германия), шириной плоского рукава (полупериметр) 120 мм. Инфракрасный спектр пленки и известный спектр сополимера близкого химического состава представлены на рис. 4.

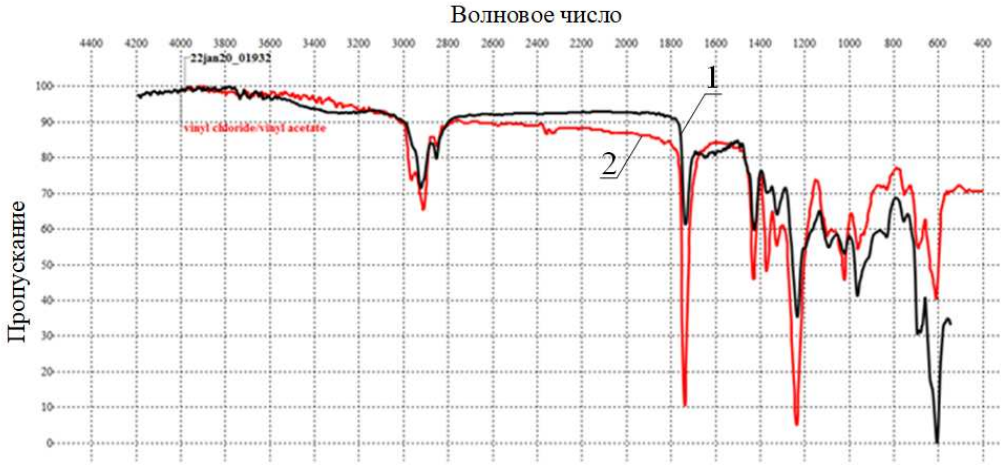


Рис. 4. ИК спектры сополимера винилхлорида с винилацетатом и термоусадочной пленки «PVC LF-T147/07 T25»: 1 – спектр пленки; 2 – спектр сополимера винилхлорида и винилацетата (библиотека ИК спектров «Заир 3.5» сборка 821)

Для калориметрических исследований структуры полимерной термоусадочной пленки, использовали дифференциальный сканирующий калориметр PC – DSC 204 Phoenix фирмы NETZSCH (Germany). В тигель калориметра помещали образцы пленки, высеченные штампом в форме микродисков диаметром 2 мм, толщиной 40 мкм и массой 10÷12 мг. При исследовании структуры измельченного внешнего слоя острым лезвием ножа снимали «стружку» толщиной менее 10 мкм с поверхности пленки, перемещая лезвие под прямым углом. Полученную «стружку» полимера навес-

кой 10÷12 мг загружали в перфорированный тигель дифференциального сканирующего калориметра. Записывали термограммы при скорости нагревания тигля 10ºС/мин. Охлаждение и повторное нагревание образцов осуществляли со скоростью 10ºС/мин.

Обсуждение результатов. Полимерные пленки с «памятью формы», могут быть применены для тактильной маркировки различных товаров, применяемых в быту, таких как средства санитарной обработки, косметика, краски, продукты питания, а также сборочные детали и ручные инструменты (рис. 5).



Рис. 5. Тактильная маркировка этикеток, оболочек и элементов гибкой упаковки из полимерной пленки с эффектом «памяти формы»

Тактильная маркировка позволяет осуществлять идентификацию предметов и контроль подлинности товаров массового потребления обычными потребителями и людьми с ограниченными возможностями (слепых или с ослабленным зрением или вниманием). Идентификация «на ощупь» облегчает контроль кабелей и трубопроводов, расположенных в труднодоступных и недостаточно освещенных местах.

Очевидно, что проявление рельефа, является результатом локальной термомодификации напряженно-деформированной структуры полимера. Трансформация макрорельефа поверхности происходит вследствие неоднородной усадки пленки.

По конфигурации рельефа, результаты маркировки термоусадочной пленки могут быть разделены на два вида «линейные» и «точечные».

Диаграмма ДСК анализа пленки сополимера винилхлорида и винилацетата имеет два экстремума противоположенного знака, имеющих один порядок величины энтальпии (рис. 6).

Энтальпия плавления кристаллических образований характеризуется максимумом «эндо пика» при температуре 68ºС, что соответствует температуре плавления сополимеров винилхлорида и винилацетата в соотношение 8:1. Степень кристалличности сополимера ~ 0,83%.

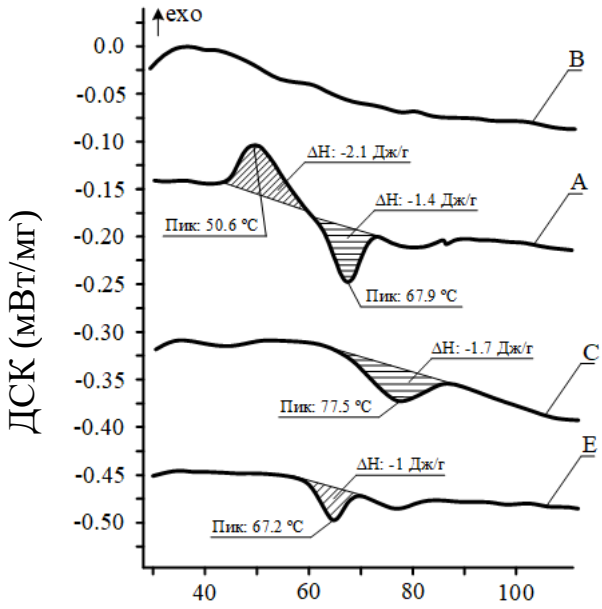


Рис. 6. Термограммы (ДСК) термоусадочных пленок: А – исходный образец (1-е плавление); В – тот же образец (2-е плавление); С – исходный образец верхний слой («стружка»); Е – исходный образец средний слой

В области 50ºС на ДСК диаграммах образцов термоусадочной пленки сополимера, имеется «экзо пик», соответствующий выделению упругой энергии из пленки при проявлении эффекта «памяти формы» в режиме нагревания пленки с постоянной скоростью [25, 26].

Удельная энергия «экзо» процесса термоусадки составляет -2 Дж/г и превосходит энтальпию плавления сополимера. При повторном нагревании пленки после охлаждения со скоростью 10ºС/мин до температуры лабораторного помещения «экзо» и «эндо» процессы на диаграмме ДСК не отображаются, что соответствует отсутствию внутренних напряжений и полной аморфизации образцов пленки после однократного нагревания выше температуры стеклования (кривая В на рис. 6).

Вязкоупругая энергия, обусловливающая эффект «памяти формы» возникает и сохраняется в термоусадочной пленке вследствие ее деформирования и быстрого охлаждения на металлической оправке, температура которой ниже температуры стеклования сополимера. Скачкообразное увеличение вязкости полимера при охлаждении и последующая докристаллизация фиксируют надмолекулярную структуру и габаритные размеры термоусадочной пленки.

Фиксация надмолекулярной структуры пленки происходит в первую очередь на ее поверхности, контактирующей с поверхностью металлического охлаждающего дорна или потоком охлажденного воздуха в зависимости от технологической схемы производства термоусадочной пленки. Образующиеся на поверхности кристаллиты имеют среднюю температуру плавления на 10°С выше чем температура плавления пленки

(~78°С). Энтальпия плавления, являющаяся мерой степени кристалличности сополимера в поверхностном слое пленки, выше величины определенной до снятия верхнего слоя на 20%.

Отсутствие «экзо пика» на ДСК диаграмме плавления измельченного поверхностного слоя сополимера винилхлорида и винилацетата (рис. 6 кривая С) показывает определяющую роль масштабного фактора в «замораживании» упругой энергии сжатия полимера. Упругая энергия сжатия проявляется на ДСК термограммах как «экзо» процесс и обусловливает самопроизвольную деформацию пленок при нагревании только при наличии продольно ориентированной макроструктуры из вязко-упругих взаимосвязанных элементов.

Таким образом, полученные экспериментальные данные позволяют утверждать, что существует предел габаритных размеров полимерных тел (пленок, волокон, труб, оболочек), ниже которых эффект эффект выделения энергии из пленки при термостимулируемой усадке не проявляется.

Заключение. Методом ДСК анализа термоусадочных пленок сополимера винилхлорида и винилацетата и механически измельченного поверхностного слоя пленок сополимера винилхлорида и винилацетата показано, что надмолекулярная структура их поверхности существенно отличается от структуры внутренних слоев. Отличие заключается в превышении на 20% степени кристалличности сополимера в поверхностном слое и более высокой температуре плавления, что указывает на увеличение доли и размеров кристаллитов на поверхности пленки. Сделано предложение о том, что измельчение поверхностного слоя пленки сополимера винилхлорида и винилацетата приводит к потере ее ориентационной макроструктуры, определяющей «память формы» и подтверждается исчезновением «экзо пика» на диаграммах ДСК. Для доказательства исключительной роли макроструктуры и доли толщины поверхностного слоя термоусадочных пленок в эффекте «памяти формы» требуются проведение дополнительных исследований с применением прямых экспериментальных методов.

Список литературы

1. Shaojun Chen, Zhankui Mei, Huanhuan Ren, HaitaoZhuo Integrated antimicrobial and shape memory zwitterionic copolymers Materials Letters. Volume 189, 2017. P. 74-77. https://doi.org/ 10.1016/ j.matlet. 2016.11.019.

2. Wei Zhao, Liwu Liu, Fenghua Zhang, JinsongLeng, Yanju Liu Shape memory polymers and their composites in biomedical applications Materials Science and Engineering: C Volume 97, 2019. P. 864-883. https://doi.org/ 10.1016/j.msec.2018.12.054.

3. Gall K., Yakacki C.M., Liu Y., Shandas R., Willett N., Anseth K.S. Thermomechanics of the shape memory effect in polymers for biomedical applications Journal of Biomedical Materials Research, 2005. Part A Volume 73. Issue 3. P. 339-348. https://doi.org/10.1002/jbm.a.30296.

4. Jingyu Wang, Jishan Luo, Robert Kunkel, MrinalSaha, Yingtao Liu Development of shape memory polymer nanocomposite foam for treatment of intracranial aneurysms Materials Letters. 2019. Volume 250. P. 38-41. https:// doi.org/ 10.1016/j.matlet.2019.04.112.

5. Hsin-Chih Lin, Yen-Lun Chang, Yin-Yi Han, Kai-Chang Yang, Minn-Chang Chen Atomic Layer Deposited Al2O3 Films on NiTi Shape Memory Alloys for Biomedical Applications Procedia Manufacturing. Volume 37. 2019. P. 431-437. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.12.070.

6. Yee Shan Wong, Abhijit Vijay Salvekar, Kun Da Zhuang, Hui Liu, Subbu S. VenkatramanBioabsorbable radiopaque water-responsive shape memory embolization plug for temporary vascular occlusion Biomaterials. 2016. Volume 102. P. 98-106. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2016.06.014.

7. Muhammad Raihan Abdul Kadir, DyahEkashantiOctorinaDewi, MohdNajebJamaludin, Marwan Nafea, Mohamed Sultan Mohamed Ali A multi-segmented shape memory alloy-based actuator system for endoscopic applications Sensors and Actuators A: Physical. 2019. Volume 296. P. 92-100. https:// doi.org/10.1016/j.sna.2019.06.056.

8. Bipin Kumar, Jinlian Hu, Ning Pan, Harishkumar Narayana A smart orthopedic compression device based on a polymeric stress memory actuator Materials & Design. 2016. Volume 97. P. 222-229. https://doi.org/ 10.1016/ j. matdes.2016.02.092.

9. Zheng Y.F., Zhang B.B., Wang B.L., Wang Y.B., Cui L.S. Introduction of antibacterial function into biomedical TiNi shape memory alloy by the addition of element Ag ActaBiomaterialia. 2011. Volume 7. Issue 6. P. 2758-2767. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.02.010.

10. Kondratov A.P. Thermo shrinking films with interval macrostructure for protection of packaging from falsification // Modern Applied Science, 2015. Vol. 8. №. 6. P. 204-209.

11. Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф. Структурные аспекты деформации аморфных полимеров // Известия Академии наук. Серия химическая. 2005. № 1. С. 1-16.

12. Kondratov A.P., Tishchenko A.S. Interval shrincable materials with shape memory for the counterfeit protection of printed products and packaging / Journal of International Scientific Publication: Materials, Methods & Technologies. 2012. Volume 6. P. 290-298.

13. Kondratov A.P., Volinsky A.A., Chen J. Scaling Effects on Color and Transparency of Multilayer Polyethylene Films in Polarized Light, Advances in Polymer Technology. 2018. Vol. 37 (3). P. 668-673.

14. Kondratov A.P., Zachinjaev G.M. Thermal cyclic tests of shrink polymeric products with the shape memory // Testing and Measurement: Techniques and Applications: Proceedings, Taylor &Francis Group. London 2015. P. 73-76.

15. Ruixue Liang, Li Wang, Haojie Yu, Amin Khan, RizwanUllah Khan Molecular design, synthesis and biomedical applications of stimuli-responsive shape memory hydrogels European Polymer Journal. 2019. Volume 114. P. 380-396. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.03.004.

16. KapileswarNayak Daniel J. Read Tom C. B. McLeish Peter J. Hine ManlioTassieri // A coarse-grained molecular model of strain-hardening for polymers in the marginally glassy state. 2011. Volume 49. Issue 13. P. 920-938. https://doi.org/10.1002/polb.22263.

17. Adriana de Campos, José Carlos Marconato, Sandra Mara Martins-Franchetti Biodegradation of blend films PVA/PVC, PVA/PCL in soil and soil with landfill leachate Braz. arch. biol. technol. Vol. 54. No. 6. Curitiba Nov./Dec. 2011. https://doi.org/10.1590/S1516-89132011000600024.

18. Giulia Scalet, FabrizioNiccoli, Cedric Garion, Paolo Chiggiato, Ferdinando Auricchio A three-dimensional phenomenological model for shape memory alloys including two-way shape memory effect and plasticity Mechanics of Materials. 2019. Volume 136. Article 103085. https://doi.org/ 10.1016/ j.mechmat.2019.103085.

19. Zhenqing Wang, Mengzhou Chang, Fangyun Kong, Kumchol Yun Optimization of thermo-mechanical properties of shape memory polymer composites based on a network model Chemical Engineering Science. 2019. Volume 207. P. 1017-1029. https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.07.022.

20. Ehsan Moshkelgosha, Mahmood Mamivand Phase field modeling of crack propagation in shape memory ceramics – Application to zirconia Computational Materials Science. 2020. Volume 174. Article 109509. https://doi.org/ 10.1016/j.commatsci.2019.109509.

21. Yunxin Li, Jianying Hu, Zishun Liu A constitutive model of shape memory polymers based on glass transition and the concept of frozen strain release rate International Journal of Solids and Structures. 2017. Volume 124. P. 252-263. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.06.039.

22. Cheikh Cisse, Wael Zaki, Tarak Ben Zineb A review of constitutive models and modeling techniques for shape memory alloys International Journal of Plasticity. 2016. Volume 76. P. 244-284. https://doi.org/10.1016/ j.ijplas. 2015.08.006.

23. Mikhail Perelmuter Modelling of materials self-healing for artery stents application Procedia Structural Integrity. 2019. Volume 15. P. 60-66. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.012.

24. Lu Dai, Chuanshuai Tian, Rui Xiao Modeling the thermo-mechanical behavior and constrained recovery performance of cold-programmed amorphous shape-memory polymers International Journal of Plasticity. 2020. Volume 127. Article 102654. https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2019.102654.

25. Аржаков М.С., Луковкин Г.М., Аржаков С.А. О природе термостимулированной низкотемпературной релаксации деформации полимерных стекол, Доклады Академии Наук, 1999. Т. 369. № 5. С. 629-631.

26. Lukovkin G.M., Arzhakov M.S., Arzhakov S.A. Generalized Character of the Viscoelastic Behavior of Amorphous Bodies // Doklady Physical Chemistry, 2003. Vol. 391. Nos. 4-6.

Кондратов Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, a.p.kondratov@mospolytech.ru, Россия, Москва, Московский политехнический университет,

Черкасов Егор Павлович, аспирант, egr1987@rambler.ru, Россия, Москва, Московский политехнический университет,

Утехин Александр Николаевич, д-р хим. наук, alutekhin@yandex.ru, Россия, Москва, Московский политехнический университет

MACROSTRUCTURE OF ANISOTROPIC POLYMER FILMS WITH «SHAPE MEMORY»

A.P. Kondratov, E.P. Cherkasov, A.N. Utekhin

Using thermomechanical analysis and differential scanning calorimetry, the film of vinyl chloride copolymer with vinyl acetate, which has the effect of «shape memory», was studied. It is shown that the supramolecular structure of the surface layer of the film differs from the supramolecular structure of the inner layers. The difference in the degree of crystallinity of the inner and surface layers and an increase in the melting temperature of crystallites in the direction to the surface was found. It is shown that grinding of the surface layer of the film causes the destruction of its macrostructure, which determines the effect of energy release from films under thermostimulation shrinkage – restore the dimensions «shape memory».

Key words: «shape memory», copolymer of vinyl chloride and vinyl acetate, supramolecular structure of the polymer, differential scanning calorimetry.

Kondratov Aleksandr Petrovich, doctor of technical sciences, professor, head of department, a.p.kondratov@mospolytech.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University,

Cherkasov Egor Pavlovich, postgraduate, egr1987@rambler.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University,

Utekhin Alexander Nikolaevich, doctor of chemical sciences, alutekhin@yandex.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University

УДК 621.671:664

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТИ, ПЕРЕКАЧИВАЕМОЙ ПИЩЕВЫМ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ НАСОСОМ, НА РАБОЧУЮ ТОЧКУ

В.А. Наумов

Рассмотрена насосная установка для перекачивания пищевых жидкостей. Предложена методика расчета параметров рабочей точки при изменении плотности жидкости. Показано, что ошибки и неточности могут привести к неверным выводам. В качестве примера выполнен расчет для пищевого центробежного насоса марки СНЦ-25/32. Увеличение плотности перекачиваемой жидкости на 25% не выводит рабочую точку за границы рекомендуемого диапазона расхода и напора насоса. При уменьшении плотности на 25% рабочая точка оказалась вне рекомендуемого диапазона.

Ключевые слова: пищевой центробежный насос, нагрузочные характеристики, расход, напор, затраченная мощность, плотность жидкости, рабочая точка.

В технологических процессах пищевой промышленности используются насосы различных типов [1, 2]. Для транспортировки жидкостей с высокой вязкостью и плохой текучестью (вязкие пасты, рыбий жир, колбасный фарш, топленый жир, тесто) применяют объемные насосы (как правило, винтовые, реже поршневые). Молоко, соки, пиво, вино и другие пищевые жидкости со сравнительно невысокой вязкостью перекачивают центробежными насосами. Для этих целей производители выпускают специальные пищевые насосы, проточные части которых изготавливают из разрешенных по нормативам материалов.

Рабочие (нагрузочные) характеристики центробежных насосов необходимы для выбора агрегатов, подходящих для работы в гидравлической системе с заданными параметрами, включая вязкость и плотность жидкости. Однако в технической документации центробежных насосов, в том числе и пищевых, содержатся рабочие характеристики, полученные при перекачивании воды. Имеется большое количество опубликованных результатов исследований рабочих характеристик при большой вязкости перекачиваемых жидкостей [3-5].

Влиянию плотности жидкости на работу центробежных насосов уделяют гораздо меньше внимания [6, 7]. Видимо, полагая этот вопрос простым и понятным. Тем не менее, появляются публикации, в которых изменение плотности учитывается неправильно. Так в [7] допущено столько ошибок, что полученные результаты совершенно не соответствуют действительности. Цель данной работы на примере [7] показать допускаемые ошибки и сформировать методику определения рабочей точки насосной установки с учетом влияния плотности жидкости, перекачиваемой пищевым насосом.

Пусть гидравлическая схема установки имеет вид, представленный на рис. 1. Всасывающий и нагнетательный трубопровод имеет одинаковый внутренний диаметр d. Общая длина трубопровода L.

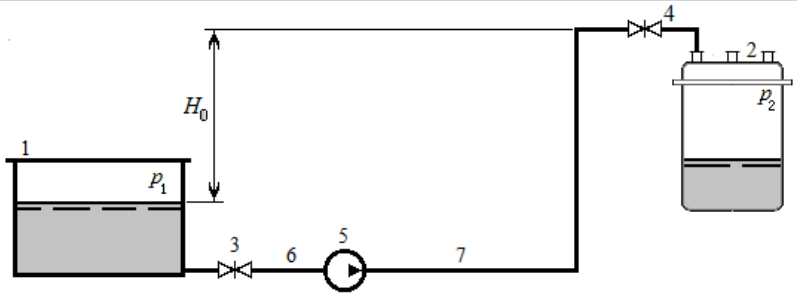


Рис. 1. Гидравлическая схема перекачивания пищевой жидкости. 1 – резервуар для хранения жидкости; 2 – рабочая камера; 3, 4 – задвижки; 5 – центробежный насос; 6 – всасывающий трубопровод; 7 – нагнетательный трубопровод

При проектировании гидравлической линии диаметр трубопровода предварительно определяют по планируемому объемному расходу перекачиваемой жидкости Q и рекомендуемой скорости ее движения W:

$$d = \sqrt{4Q/(\pi W)}. \quad (1)$$

Авторы [7] вместо объемного расхода (м^3/с) подставляют в формулу (1) массовый расход (кг/с). Обозначим его G.

Из уравнения Бернулли гидравлической системы на рис. 1 следует формула для потребного напора:

$$H_H = \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g} + H_0 + \Sigma h. \quad (2)$$

где p_2 – давление в рабочей емкости (например, теплообменнике), Па; p_1 – давление в резервуаре, из которого перекачивают жидкость, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, м/с^2; H_0 – геометрическая высота подъема жидкости, м; Σh – сумма потерь напора, м.

Так как диаметры всасывающего и нагнетательного трубопровода одинаковы, сумму гидравлических потерь можно найти по формуле:

$$\Sigma h = \left(\lambda \frac{L}{d} + \zeta\right) \cdot \frac{W^2}{2g} = \left(\lambda \frac{L}{d} + \zeta\right) \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{g \cdot \left(\pi d^2\right)^2}, \quad (3)$$

где λ – коэффициентов гидравлических потерь на трение по длине трубопровода; L – общая длина трубопровода, м; ζ – сумма коэффициентов потерь напора во всех местных сопротивлениях (вход и выход из трубопровода, повороты, задвижки). Заметим, в [7] в формулах, подобных (3), допущена ошибка, отсутствует последний множитель. В действительности, потребный напор является функцией расхода и зависит от плотности: $H_H = \varphi(Q, \rho)$.

Так как рассматриваются сравнительно маловязкие жидкости, полагаем режим течения турбулентным. Тогда для расчета λ можно использовать известную формулу Альтшуля:

$$\lambda = 0{,}11 \cdot \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re}\right)^{0{,}25}, \quad Re = \frac{W \cdot d}{\nu}, \quad (4)$$

где Δ – абсолютная шероховатость трубопровода, м; *Re* – число Рейнольдса; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м^2/с.

Полезная (гидравлическая) мощность при перекачивании жидкости рассчитывается по формуле:

$$N_H = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_H . \quad (5)$$

В работе [7] рассчитана зависимость гидравлической мощности от массового расхода для трех жидких продуктов с разной плотностью и динамической вязкостью μ. Графики представлены на рис. 2 (все обозначения и качество рисунка из [7] сохранены).

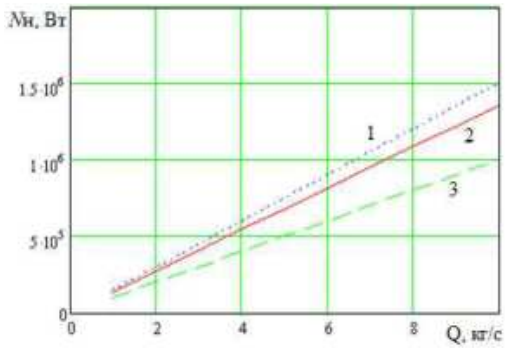


Рис. 2. Зависимость из [7] гидравлической мощности от массового расхода для 3-х жидкостей: 1 – ρ=750 кг/м^3; μ=0,001 Па·с; 2 – ρ = 1051 кг/м^3; μ=0,00175 Па·с; 3 – ρ=1120 кг/м^3; μ=0,002 Па·с

Первое, что бросается в глаза, глядя на рис. 2, неправдоподобно большая величина N_H – до 1,5 МВт. Обращаем внимание на обозначение абсциссы. Скорее всего, авторы [7] вновь ошиблись, подставили в формулу (5) массовый расход *G*, а не объемный *Q*. Вот и получилась мощность примерно в тысячу раз больше, чем должна быть.

Следующее несоответствие на рис. 2 – гидравлическая мощность линейно зависит от расхода. Этот неверный результат является следствием отмеченной выше потерей в формуле (3) зависимости Σ*h* от расхода. Из текста [7] совершенно невозможно понять, как учитывалось влияние вязкости; нет ни формул, ни ссылок на источники.

В [7] приведено два совершенно одинаковых изображения, как на рис. 2. Но второй почему-то именуется «…зависимость мощности на валу двигателя от расхода…». Мощность на валу двигателя насоса авторы [7] предлагают рассчитывать, поделив гидравлическую мощность на КПД (ошибочно включают в него и КПД электродвигателя). Но КПД насоса зависит от расхода. Эту задачу невозможно решить без рабочих характеристик насоса и определения рабочей точки насосной установки.

После разбора череды ошибок нет смысла останавливаться на выводах [7]. Перейдем к рассмотрению методики учета влияния плотности на работу пищевого центробежного насоса.

Как и в [7] рассмотрим работу пищевого насоса типа СНЦ. Но рассмотрение не может быть абстрактным. Центробежные электронасосы СНЦ выпускает Щелковский насосный завод. Для анализа влияния плот-

ности потребуются технические параметры (табл. 1) и нагрузочные характеристики. Допустимая высота всасывание всех этих насосов – 4 м, частота вращения – 2900 об/мин. В табл. 1 P – мощность электродвигателя.

Таблица 1

Технические параметры пищевых электронасосов СНЦ [8]

Марка насоса	Подача, Q, м^3/час			Напор, H, м			P, кВт
	nom	min	max	nom	min	max	
СНЦ-6,3/20	6,3	4	9	20	19	22	1,5
СНЦ-12,5/20	12,5	9	16	20	19	22	2,5
СНЦ-25/32	25	18	32	32	28	34	5,5

Далее будем рассматривать расчет на примере насоса СНЦ-25/32. Его нагрузочные характеристики содержатся в технической документации [8] и представлены на рис. 3.

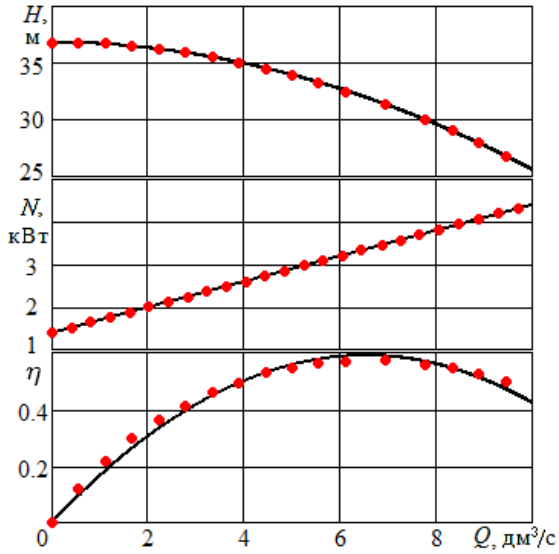


Рис. 3. Нагрузочные характеристики насоса СНЦ-25/32. Точки – данные испытаний [8], линии – результаты расчета по (6)

Как и в [9], методом наименьших квадратов были подобраны коэффициенты многочленов для аппроксимации зависимостей (табл. 2):

$$\Theta_k = f_k(Q) = a_{k0} + a_{k1} \cdot Q + a_{k2} \cdot Q^2, \quad \Theta = \{H, N, \eta\}, \qquad (6)$$

где H – напор насоса, м; N – затраченная (потребная) мощность насоса, кВт; η – коэффициент полезного действия (КПД) насоса.

Таблица 2

Эмпирические коэффициенты в многочленах аппроксимации

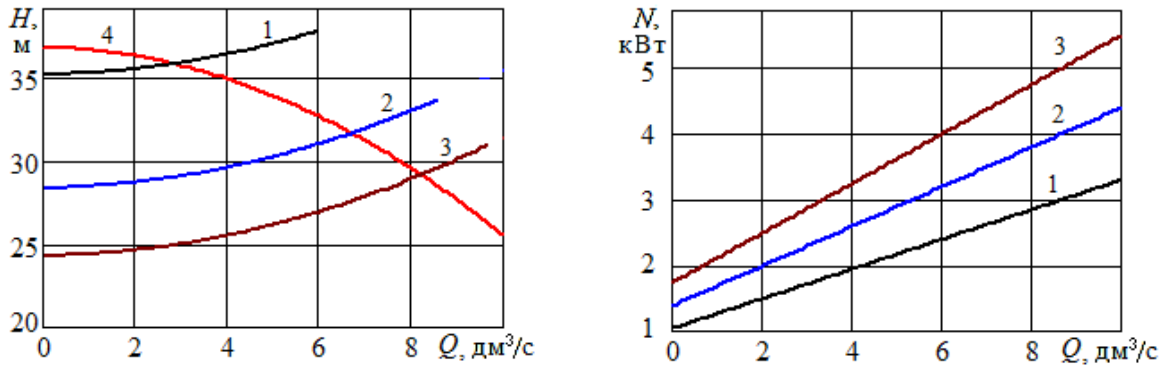
k	Характеристика	a_{k0}	a_{k1}	a_{k2}	R^2
1	H	36,8	–36,09	–108,6	0,99
2	N	1,39	300,7	0	0,99
3	η	0	180,4	–138,1	0,97

Индекс детерминации R^2 в табл. 2 показывает хорошее согласие результатов расчетов с данными испытаний.

По технической документации насос СНЦ-25/32 предназначен для перекачивания пищевых жидкостей с плотностью не более 1250 кг/м^3. В расчете устанавливаем диапазон плотностей от 750 до 1250 кг/м^3.

Общепринято считать, что при увеличении плотности перекачиваемой жидкости в β раз напорная характеристика центробежного насоса Q–H не меняется, а потребная мощность увеличивается во столько же раз [10, 11]. Поэтому на рис. 4а зависимость H от Q (линия 4) осталась такой же, как на рис. 3. На рис. 4b линия 2 соответствует перекачиванию воды, линия 3 получена как 1,25·N, 1 – 0,75·N.

Расчет характеристики трубопровода был выполнен при трех плотностях жидкости и следующих значениях параметров: p_2–p_1 = 200 кПа; d=80 мм; Δ=0,1 мм; ν = 1 мм^2/с; ζ=7,4; H_0 = 8 м. На рис. 4а линия 1 выше, а линия 3 ниже, чем линия 2. Это связано с изменением статического напора для жидкостей разной плотности (первое слагаемое в формуле (2)).



а ***б***

Рис. 4. Результаты расчета характеристик при трех значениях плотности жидкости: а – напор, b – потребная мощность; 1 – ρ = 750 кг/м^3; 2 – ρ = 1000 кг/м^3; 3 – ρ = 1250 кг/м^3

Встречается мнение, что КПД насоса при увеличении плотности несколько возрастает [10]. Однако производители насосов такое увеличение не подтверждают [11]. Эксперименты, проведенные на гидравлическом стенде Калининградского государственного технического университета [12] также не обнаружили изменений КПД. Будем считать, что нижний график на рис. 3 не меняется в заданном диапазоне плотностей жидкости.

Для определения параметров рабочей точки насосной установки находим координаты точек пересечения на рис. 4, а, решаем для каждой плотности жидкости уравнение (i = 1; 2; 3):

$$f_1(Q_i) = \varphi(Q_i, \rho_i). \qquad (7)$$

По корню уравнения (7) рассчитываем напор, потребную мощность и КПД насоса:

$$H_i = f_1(Q_i),\ \ N_i = \beta_i \cdot f_2(Q_i),\ \ \eta_i = f_3(Q_i);\ \ \beta_i = \rho_i / \rho_2. \qquad (8)$$

Результаты расчета показаны в табл. 3.

Таблица 3

Параметры рабочей точки насосной установки СНЦ-25/32

ρ, кг/м^3	*Q*, дм^3/с	*G*, кг/с	*H*, м	*N*, кВт	η
750	2,84	2,13	35,8	1,68	0,401
1000	6,17	6,17	31,7	3,14	0,588
1250	8,22	10,28	29,2	4,83	0,549

Рекомендуемый диапазон работы насоса СНЦ-25/32 (табл. 1) по расходу от 5 до 8,89 дм^3/с, по напору – от 28 до 34 м. По табл. 3 увеличение плотности перекачиваемой жидкости на 25% оставляет параметры рабочей точки в пределах рекомендуемого диапазона. При уменьшении плотности на 25% параметры рабочей точки оказываются вне рекомендуемого диапазона и по расходу, и по напору; КПД насоса снижается до 40 %.

Список литературы

1. Хохлов Ф.В. Насосы, применяемые в пищевой промышленности // Пиво и напитки. 2004. № 1. С. 36.

2. Кавецкий Г.Д., Касьяненко В.П. Процессы и аппараты пищевой технологии: учебник. М.: КолосС, 2008. 591 с.

3. Ивановский В.Н., Пекин С.С., Янгулов П.Л. Влияние вязкой жидкости на рабочую характеристику электроцентробежных насосов // Территория Нефтегаз. 2012. № 9. С. 48-55.

4. Torabi R., Nourbakhsh S.A. The effect of viscosity on performance of a low specific speed centrifugal pump // International Journal of Rotating Machinery. 2016. Vol. 6. 9 p.

5. Пещеренко С.Н., Лебедев Д.Н., Павлов Д.А. Влияние вязкости жидкости на рабочие характеристики насоса ЭЦН7А-1000 // Вестник Тюменского государственного университета. 2018. Т. 4. № 4. С. 64-79.

6. Солонщиков П.Н. Эффективность работы установки для приготовления смесей как лопастного насоса // Вестник НГИЭИ. 2016. № 12. С. 77-85.

7. Мишакова В.А., Рожков А.М. Анализ основных параметров центробежных насосов для пищевой промышленности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 7. С. 138-142.

8. Электронасосы типа СНЦ. Технические характеристики [Электронный ресурс]. URL: http://www.agrovodcom.ru/file/pdf/ena_cnz.pdf (дата обращения: 09.04.2020).

9. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И. Методика выбора центробежных скважинных насосов типа ЭЦВ // Технико-технологические проблемы сервиса. 2017. № 1 (39). С. 18-21.

10. Эксплуатация механо-технологического оборудования: курс лекций / Ю.Д. Земенков, С.Ю. Подорожников, В.В. Голик и др.; под ред. Ю.Д. Земенкова. Тюмень: Изд-во Тюменского индустриального университета, 2019. 257 с.

11. Grundfos. Промышленное насосное оборудование [Электронный ресурс. URL: https://ru.grundfos.com/documentation/book.html (дата обращения: 12.04.2020).

12. Наумов В.А., Черных Т.И. Градуировка дроссельного расходомера в нестандартных условиях // VII Международный Балтийский морской форум (7-12 октября 2019 г.) [Электронный ресурс]. Материалы конференции в 6 томах. Т.1. Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2019. С. 338-344. 1 электрон. опт. диск.

Наумов Владимир Аркадьевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, van-old@mail.ru, Россия, Калининград, Калининградский государственный технический университет

INFLUENCE OF DENSITY OF THE LIQUID PUMPED BY THE FOOD CENTRIFUGAL PUMP ON THE WORKING POINT

V.A. Naumov

The pumping unit for food liquids was considered. The method for calculating the parameters of the working point when changing the density of the liquid was proposed. It is shown that errors and inaccuracies can lead to incorrect conclusions. The calculation for the food-grade centrifugal pump SNC-25/32 was performed as an example. Increasing the density of the pumped liquid by 25% does not take the operating point beyond the recommended range of flow and head of the pump. The working point was outside the recommended range after a 25% reduction in density.

Key words: food-grade centrifugal pump, load characteristics, flow, head, power consumed, liquid density, working point.

Naumov Vladimir Arkad'evich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, van-old@mail.ru, Russia, Kaliningrad, Kaliningrad State Technical University

УДК 778.14.072

МИКРОГРАФИЯ НА ФОТОПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНКАХ: ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ

О.В. Демьянов

Рассмотрены основные этапы электрофотографического процесса. Рассмотрен процесс формирования изображения на фотопроводящих пленках разных видов. Разобрано строение двухслойной и трехслойной фототермопластической пленки.

Ключевые слова: микрография, фотопроводящие пленки, фототермопластическая запись, трехслойная пленка, двухслойная пленка, деформируемый слой, строение, полимерный слой, электрофотография.

Микрография может базироваться на использовании несеребряных светочувствительных материалов и на этапе получения микроформ, и при последующем их размножении и уже в процессе эксплуатации.

Наибольший интерес здесь представляют фотографические способы, применяющиеся на первом этапе – при создании микроформ. Получение микроформы с оригинала может осуществляться способом электрофотографии, фототермопластической записью или при помощи миграционного процесса.

Рассматривать процесс фототермопластической записи надо с процесса электрофотографии, на котором он базируется.

Первый этап фотографического процесса заключается в электризации коронным разрядом светочувствительного фотопроводящего слоя (рис. 1).

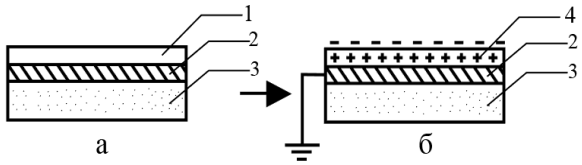


Рис. 1. Электризация поверхности регистрирующего материала: 1 − незаряженный фотопроводящий слой; 2 − электропроводящий подслой; 3 − подложка; 4 − заряженный фотопроводящий слой

При электризации на поверхности регистрирующего материала формируются электрический заряд. Его полярность определяется полярностью коронного разряда. При этом на подложке образуются противоположные по знаку заряды, притягивающиеся согласно закону Кулона. Длительную сохранность зарядов можно обеспечить, если хранить заряженный материал в темноте.

Образование скрытого изображение достигается при помощи экспонирования поверхности фотопроводящего слоя с равномерно нанесенным на этапе электризации зарядом. В этом случае происходит увеличение электропроводности освещенных участков и заряд «стекает» через электропроводящий слой или заземленную подложку [1]. При помощи остаточных зарядов, сохранившихся на неэкспонированных участках, формируется скрытое изображение (рис. 2).

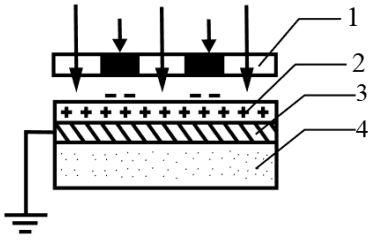


Рис. 2. Экспонирование: 1 − оригинал; 2 − заряженный фотопроводящий слой; 3 − электропроводящий подслой; 4 − подложка

По сути, процесс экспонирования фотопроводящего материала приводит лишь к временным изменениям его свойств и после помещения материала в темноту, электропроводность со временем возвращается к ис-

ходным значениям. Но использование в электрофотографии заряженных фотопроводников способствует перераспределению зарядов при временном увеличении электропроводности. При световом воздействии фотопроводник становится проводником и формирование изображения происходит исключительно на заряженных участках.

На следующем этапе происходит проявление скрытого изображения (рис. 3).

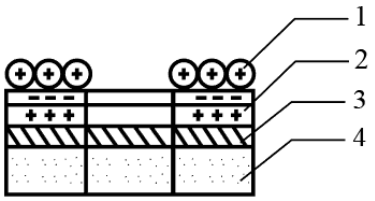


Рис. 3. Проявление скрытого изображения: 1 − частицы проявителя; 2 − заряженный фотопроводящий слой; 3 − электропроводящий подслой; 4 − подложка

Процесс проявления может выполняться с применением сухого или жидкого проявителя.

Благодаря силе электростатического взаимодействия частицы тонера удерживаются на поверхности, а частицы носителя – отталкиваются от него, так как они имеют противоположный заряд. Удержание частиц тонера осуществляется исключительно на фрагментах скрытого изображения.

На следующем этапе производится закрепления изображения термическим или термосиловым способом – при помощи температуры и давления. Процесс закрепления изображения представлен на рис. 4.

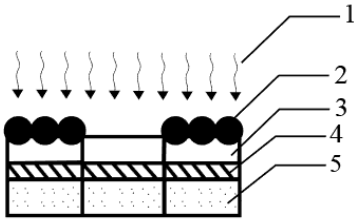


Рис. 4. Закрепление изображения: 1 – тепло; 2 − элементы оптического изображения; 3 − фотопроводящий слой; 4 − электропроводящий подслой; 5 − подложка

Способ закрепления изображения зависит от выбранного способа проявления, термический способ чаще используется при жидкостном проявлении.

Рассмотренная схема электрофотографического процесса используется для создания микроформ первого поколения и их копий.

Фототермопластическая запись основана на электрофотографическом процессе и отличается от него стадией проявления. Для проявления скрытого изображения используется быстрое нагревание

пленки, температура нагрева достигает 170° С. Варианты строения пленки, использующиеся для фототермопластической записи, представлены на рис. 5, 6.

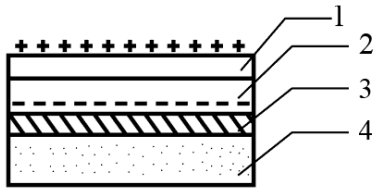


Рис. 5. Строение трехслойной пленки: 1 − прозрачный термопластичный полимер; 2 − фотопроводящий слой; 3 − полупрозрачный металлический электропроводящий слой; 4 − подложка

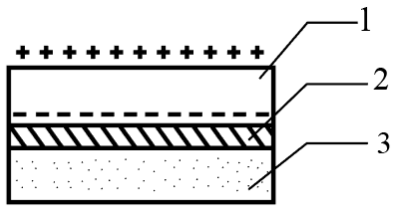


Рис. 6. Строение двухслойной пленки: 1 − фотопроводящий термопластичный полимер; 2 − полупрозрачный металлический электропроводящий слой; 3 − подложка

Процесс формирования изображения может включать три или четыре этапа. При работе с двухслойными материалами процесс получения скрытого изображения схож с электрофотографическим: на первом этапе проводится электризация поверхности, затем экспонирование и, наконец, проявление изображения.

Трехслойная пленка требует прохождения еще одного этапа − дополнительного заряда коронным разрядом после ее экспонирования (рис. 7).

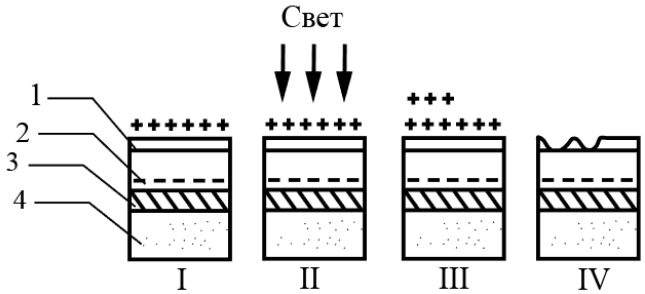


Рис. 7. Схема получения изображения на трехслойной фототермопластической пленке: 1 − прозрачный термопластичный полимер; 2 − фотопроводящий слой; 3 − полупрозрачный металлический электропроводящий слой; 4 – подложка; I – электризация; II – экспонирование; III − повторное заряжение; IV – проявленная пленка

Дополнительное заряжение выполняют для того, чтобы избежать образования барьерного слоя после экспонирования на границе фотопроводящего и термопластичного слоев. Возникновение такого барьера может спровоцировать снижение электростатического контраста скрытого изображения.

И для двухслойной и для трехслойной пленки принцип получения видимого изображения одинаков. Оно формируется во время деформации слоя термопластичного полимера, вызванной электростатическим взаимодействием разноименно заряженных поверхностей слоя. При стандартных условиях электростатическое взаимодействие не имеет силы сопоставимой с силой сопротивления полимера деформации, так что сформированное изображение является скрытым [2].

Чтобы изменить это полимер размягчают при помощи термического воздействия до состояния, когда сопротивление полимера деформации становится меньше силы электростатического притяжения скрытого изображения зарядам электропроводящего слоя.

Результатом этого процесса становится получения множества канавок с разной глубиной, соответствующей потенциалу данного элемента изображения. Закрепление изображения происходит при охлаждении пленки.

В итоге сформированное изображение является не чем иным, как скоплением многочисленных канавок, хаотично рассеивающих свет. Такой способ формирования изображения лег в основу его названия – «деформационное». Размер каждой канавки измеряется в микронах. Столь малый размер позволяет получить высокую разрешающую способность, но при этом создает неудобства в работе из-за того, что свет рассеивается равномерно всеми участками изображения. Для работы с такой пленкой используется специальное оборудование – шлирен-проектор. В основе заложен метод Теплера, заключающийся в выявлении оптических неоднородностей прозрачных, преломляющих сред, и нахождения дефектов отражающих поверхностей [3].

Так как изображение полностью зависит от глубины сформировавшихся канавок, при фототермопластической записи важно также обращать внимание на характеристики используемого полимера, его физико-химические свойства, поверхностное натяжение и диэлектрические характеристики.

Список литературы

1. Книги по химии. Микрофильмирование [Электронный ресурс]. URL: http://booksonchemistry.com/index.php?id1=3&category=laborotor-tech & author = sluckin-aa&book=1990&page=43 (дата обращения: 03.05.2020).

2. Репрография [Электронный ресурс]. URL: http://www.cnshb.ru/AKDiL/0048/base/RR/210001.shtm (дата обращения: 01.05.2020).

3. Шлирен-метод [Электронный ресурс] URL: https://kartaslov.ru/карта-знаний/Шлирен-метод (дата обращения: 01.05.2020).

Демьянов Олег Валерьевич аспирант, demjanovo@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MICROGRAPHY ON PHOTOCONDUCTIVE FILMS: PHOTOTHERMOPLASTIC RECORDING

O.V. Demyanov

The main stages of the electro photographic process are considered. The process of image formation on photoconductive films of different types is considered. The structure of a two-layer and a three-layer photo thermoplastic film is disassembled.

Key words: micrography, photoconductive films, photo thermoplastic recording, three-layer film, two-layer film, deformable layer, structure, polymer layer, electrophotography.

Demyanov Oleg Valerevich, postgraduate, demjanovo@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 519.23; 621.798.144.08

РАСЧЕТ ДВУХСТУПЕНЧАТЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПЛАНОВ КОНТРОЛЯ РАЗМЕРОВ КОРПУСА АЛЮМИНИЕВЫХ БАНОК

О.В. Пантюхин, Е.В. Пантюхина, О.Д. Рожкова

В статье проведен расчет двухступенчатых информационных планов контроля основных геометрических параметров корпуса алюминиевых банок на основе метода расчета двухступенчатых информационрных планов контроля.

Ключевые слова: алюминиевая банка, план контроля.

Для розлива различных напитков широко применяют алюминиевые банки. Анализ технологии их производства позволил определить оптимальные параметры технологических операций, при которых алюминиевая банка будет соответствовать основным требованиям технических условий [1-3].

От качества изготовления банок во многом зависит сохранность упакованного в них напитка и удовлетворенность потребителя. Наиболее важными параметрами качества алюминиевой банки являются ее геометрические размеры. Согласно ГОСТ 33748-2016 [4] для контроля качества размеров алюминиевых банок проводят приемо-сдаточные испытания. При проведении данной процедуры применяется одноступенчатый план контроля, методика которого приведена в ГОСТ Р ИСО 3951-1-2015 [5].

Однако, сравнивая планы одноступенчатого контроля с двухступенчатыми, видим, что первые характеризуются рядом существенных недостатков [6]. При проведении контроля довольно часто количество бракованных единиц продукции d в выборке на одну или две единицы выше приемочного числа c. При этом отбраковка всей партии изделий по результатам контроля одной выборки будет экономически нецелесообразна. В связи с этим представляется наиболее обоснованным использование двухступенчатых планов контроля выпускаемых изделий.

Процесс двухступенчатого контроля состоит в том, что сначала производят извлечение первой выборки объемом n_1. В случае, если число дефектных изделий в первой выборке $d_1 \le c_1$, то вся партия считается годной, а при $d_1 > c_1$ партия бракуется. Когда соблюдается условие $c_1 < d_1 \le c_2$, то извлекают вторую выборку объемом n_2. При сумме дефектных изделий в первой и второй выборках $d_1 + d_2 \le c_3$ партия принимается. В обратном случае, когда $d_1 + d_2 > c_3$, происходит забраковка всей партии.

Таким образом, процедура включает следующие параметры: n_1, n_2, c_1, c_2, c_3, где c_1, c_2, c_3 – приемочные числа, в отношении которых должно выполняться условие $c_1 < c_2 < c_3$.

Применим для контроля геометрических размеров алюминиевой банки после первой и последней вытяжек метод расчета двухступенчатых планов контроля, заключающийся в следующем. Вводится понятие функции оптимального плана контроля

$$F(n,c) = P_\beta - \lambda_\alpha \alpha - \lambda_0 \overline{n}, \qquad (1)$$

где $P_\beta = 1-\beta$ – мощность критерия качества партии (вероятность недопущения ошибки второго рода (риска потребителя); α – вероятность забраковки партии изделий допустимого качества (риск изготовителя); $\overline{n}$ – средний объем выборки двухступенчатого плана контроля при гипотезе H_0 о допустимом качестве партии; λ_α и λ_0 – множители Лагранжа [6].

Формирование планов контроля будем проводить с учетом следующего: во-первых, вероятность отклонить партию с приемочным уровнем дефектности $q_0 = AQL$ не должна превышать заранее выбранного риска изготовителя α (примем $\alpha = 0{,}05$); во-вторых, предел среднего выходного уровня дефектности $AOQL = \max(AOQ) \approx \frac{c}{n} \cdot L\left(\frac{c}{n}\right)$ не может превысить $D_{\max}$ ($D_{\max} = 2 \cdot q_0$); в-третьих значение $F(n,c)$ для рассчитанного плана должно быть максимально

$$\left.\begin{array}{l} 1 - L(AQL) \le \alpha \\ AOQL \le D_{\max} \\ F(n,c) = \max \end{array}\right\}, \qquad (2)$$

где $L(AQL)$ – значение оперативной характеристики при $q_0 = AQL$.

В качестве оперативной характеристики двухступенчатого плана контроля алюминиевых банок воспользуемся информационной моделью, предложенной в работе [7] следующего вида

$$L(H)=P\left(\hat{H}\le H_0|H\right)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\cdot\sigma(\hat{H})}\cdot\int_{-\infty}^{H_0}\exp\left[-\frac{\left(\hat{H}-H(q)\right)^2}{2\cdot\sigma^2\left(\hat{H}\right)}\right]d\hat{H}, \qquad (3)$$

где $L(H)$– оперативная характеристика информационного плана контроля (ИПК); $P\left(\hat{H}\le H_0|H\right)$ – вероятность принятия гипотезы о допустимом качестве партии, когда энтропия процесса равна:

$$H=H(q)=-q\cdot\ln q-(1-q)\cdot\ln(1-q);H_0=H\left(q_0=c_1/n_1\right); \qquad (4)$$

$$\sigma\left(\hat{H}\right)=\sqrt{\frac{q\cdot\ln^2 q+(1-q)\cdot\ln^2(1-q)-H(q)^2}{n}}. \qquad (5)$$

Целесообразность выбора этой функции обусловлена зависимостью значения оперативной характеристики $L(H)$ от энтропии H, характеризующей состояние процесса производства алюминиевых банок, являясь при этом функцией уровня дефектности q.

Выполним расчёт ИПК для входных данных: N, q_0 и браковочного уровня дефектности q_1, равного $2\,q_0$.

Вычислим энтропию по выражениям

$$H(q_0)=-q_0\cdot\ln q_0-(1-q_0)\cdot\ln(1-q_0), \qquad (6)$$

$$H(q_1)=-q_1\cdot\ln q_1-(1-q_1)\cdot\ln(1-q_1). \qquad (7)$$

Для нахождения n_1 и c_1 построим поверхность $F(n_1,c_1)$

$$F(n_1,c_1)=P_\beta(n_1,c_1)-\lambda_\alpha\alpha(n_1,c_1), \qquad (8)$$

где вероятность забраковки партии алюминиевых банок допустимого качества на первой ступени контроля

$$\alpha(n_1,c_1)=\int_0^{n_1}\frac{c_1}{n_1^2\cdot\sigma_0(n_1)\cdot\sqrt{2\pi}}\cdot\exp^{-\frac{c_1^2}{2\cdot\sigma_0^2(n_1)\cdot n_1^2}}dn_1, \qquad (9)$$

а вероятность забраковки партии алюминиевых банок браковочного качества на первой ступени контроля

$$P_\beta(n_1,c_1)=\int_0^{n_1}\frac{c_1}{n_1^2\cdot\sigma_1(n_1)\cdot\sqrt{2\pi}}\cdot\exp^{-\frac{c_1^2}{2\cdot\sigma_1^2(n_1)\cdot n_1^2}}dn_1, \qquad (10)$$

при этом

$$\sigma_0(n_1)=\sqrt{\frac{q_0\cdot\ln^2 q_0+(1-q_0)\cdot\ln^2(1-q_0)-H(q_0)^2}{n_1}}, \qquad (11)$$

$$\sigma_1(n_1)=\sqrt{\frac{q_1\cdot\ln^2 q_1+(1-q_1)\cdot\ln^2(1-q_1)-H(q_1)^2}{n_1}}. \qquad (12)$$

Значение λ_α найдем при $\alpha=0{,}05$

$$\lambda_\alpha = \frac{\alpha}{\alpha(0{,}1\cdot N, c_{1\max})} = \frac{0{,}05}{\alpha(0{,}1\cdot N, c_{1\max})}. \qquad (13)$$

Применив встроенную в *Mathcad* функцию *CreateMech*, получим поверхность $F(n_1, c_1)$. Задавшись минимальным и максимальным значениями изменения n_1 и c_1, рассчитаем их с помощью функции *Maximize*, при этом $F(n_1, c_1)$ должна достигнуть максимума. Получим ИПК первой ступени.

Для вычисления n_2 и c_2 строим $F(n_2, c_2)$ в виде

$$F(n_2, c_2) = P_\beta(n_2, c_2) - \lambda_\alpha \alpha(n_2, c_2) - \lambda_0 \cdot \bar{n}(n_2, c_2), \qquad (14)$$

где

$$\alpha(n_2, c_2) = \int_0^{n_1} \frac{c_1}{n_1^2 \cdot \sigma_0(n_1)\cdot\sqrt{2\pi}} \cdot \exp^{-\frac{c_1^2}{2\cdot\sigma_0^2(n_1)\cdot n_1^2}} dn_1 +$$

$$+ \int_0^{n_1} \frac{c_1}{n_1^2 \cdot \sigma_0(n_1)\cdot\sqrt{2\pi}} \cdot \exp^{-\frac{c_1^2}{2\cdot\sigma_0^2(n_1)\cdot n_1^2}} dn_1 \times \qquad , \qquad (15)$$

$$\times \int_{n_1+1}^{n_1+n_2} \frac{c_2}{n_2^2 \cdot \sigma_0(n_2)\cdot\sqrt{2\pi}} \exp^{-\frac{c_2^2}{2\cdot\sigma_0^2(n_2)\cdot n_2^2}} dn_2$$

$$P_\beta(n_2, c_2) = \int_0^{n_1} \frac{c_1}{n_1^2 \cdot \sigma_1(n_1)\cdot\sqrt{2\pi}} \cdot \exp^{-\frac{c_1^2}{2\cdot\sigma_1^2(n_1)\cdot n_1^2}} dn_1 +$$

$$+ \int_0^{n_1} \frac{c_1}{n_1^2 \cdot \sigma_1(n_1)\cdot\sqrt{2\pi}} \cdot \exp^{-\frac{c_1^2}{2\cdot\sigma_1^2(n_1)\cdot n_1^2}} dn_1 \times \qquad , \qquad (16)$$

$$\times \int_{n_1+1}^{n_1+n_2} \frac{c_2}{n_2^2 \cdot \sigma_1(n_2)\cdot\sqrt{2\pi}} \exp^{-\frac{c_2^2}{2\cdot\sigma_1^2(n_2)\cdot n_2^2}} dn_2$$

а средний объем двухступенчатого плана контроля определим по выражению

$$\bar{n}(n_2, c_2) = n_1 + \int_{n_1+1}^{n_1+n_2} \frac{c_2 \cdot n_2}{n_1^2 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp^{-\frac{c_2^2}{2\cdot\sigma_0^2\cdot n_1^2}} dn_2. \qquad (17)$$

Значения λ_0 и λ_α вычислим при $\alpha = 0{,}05$ и риске потребителя $\beta = 0{,}1$

$$\lambda_0 = \frac{(1-\beta)-\alpha}{\bar{n}(0{,}1\cdot N, c_{2\max})} = \frac{0{,}9-0{,}05}{\bar{n}(0{,}1\cdot N, c_{2\max})}, \qquad (18)$$

$$\lambda_\alpha = \frac{\alpha}{\overline{n}(0{,}1 \cdot N, c_{2\max})} = \frac{0{,}05}{\overline{n}(0{,}1 \cdot N, c_{2\max})}. \quad (19)$$

Аналогично расчету первой ступени контроля строим поверхность $F(n_2, c_2)$ и получаем ИПК для второй ступени контроля.

Используя вышеописанный метод расчета планов, получим таблицу, в которой отражены двухступенчатые ИПК размеров корпуса алюминиевых банок при AQL =0,65%. Учитывая специфику производства алюминиевых банок, выберем объемы партий $N = 10000, 100000, 500000$ штук.

Двухступенчатые информационные планы контроля размеров корпуса алюминиевых банок при AQL =0,65%

N=10000						
№ ИПК	c_1	c_2	c_3	n_1	n_2	α
1	1	3	4	40	40	0,05
N=100000						
2	1	3	4	60	60	0,05
N=500000						
3	1	3	4	80	80	0,05

Таким образом, с применением данного метода расчета предлагается контролировать геометрические параметры качества алюминиевой банки после первой и последней вытяжек при ее производстве. Это позволит обеспечить качество изготавливаемых партий и предотвратить выпуск бракованной продукции в условиях массового производства.

Список литературы

1. Давыдов И.Б., Пузиков И.В., Рожкова О.Д. Анализ технологии производства алюминиевых банок для пивоваренной промышленности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 3. С. 460-464.

2. Рожкова О.Д. Анализ и методика расчета процесса вытяжки при производстве алюминиевых банок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 10. С. 531-536.

3. Рожкова О.Д. Исследование основных параметров процесса вытяжки корпуса алюминиевых банок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 3. С. 521-527.

4. ГОСТ 33748-2016. Банки алюминиевые глубокой вытяжки с легковскрываемыми крышками. Общие технические условия. М., 2016. 28 с.

5. ГОСТ Р ИСО 3951-1-2015. Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по количественному признаку. Требования к одноступенчатым планам на основе AQL при контроле последовательных партий по единственной характеристике и единственному AQL. М., 2015. Часть 1. 72 с.

6. Пантюхин О.В. Расчет двухступенчатых планов выборочного контроля по методу множителей Лагранжа // Известия Тульского государственного университета. Технология машиностроения. 2003. Вып. 1. С. 108-111.

7. Григорович В.Г., Юдин С.В., Козлова Н.О., Шильдин В.В. Информационные методы в управлении качеством. М.: РИА «Стандарты и качество», 2001. 208 с.

Пантюхин Олег Викторович, канд. техн. наук, доцент, директор Издательства, olegpantyukhin@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Пантюхина Елена Викторовна, канд. техн. наук, доцент, elen-davidova@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Рожкова Оксана Дмитриевна, магистрант, od.rozhkova@rmc-holding.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

CALCULATION OF TWO-STAGE INFORMATION PLANS FOR CONTROLLING THE SIZE OF THE ALUMINUM CANS BODY

O.V. Pantyukhin, E.V. Pantyukhina, O.D. Rozhkova

The article presents the calculation of two-stage information control plans for the main geometric parameters of the aluminum cans body based on the method of calculating two-stage information control plans.

Key words: aluminum cans, control plan.

Pantyukhin Oleg Viktorovich, candidate of technical science, docent, director of the publishing house, olegpantyukhin@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Pantyukhina Elena Viktorovna, candidate of technical science, docent, elen-davidova@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Rozhkova Oksana Dmitrievna, masters, od.rozhkova@rmc-holding.com, Russia, Tula, Tula State University

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Алдошин М.В., Андросов А.Ю., Бородащенко А.Ю., Зуева Ю.Г.
Модифицированный алгоритм исправления ошибок
в информационно-поисковых запросах ……... 3

Кузьмин И.Е., Сафронов А.А., Баранова Е.М., Борзенкова С.Ю.
Разработка системы вычисления степени согласованности мнений экспертов в сфере информационной безопасности методом нахождения коэффициента конкордации ……. 11

Лапидус А.А., Хубаев А.О.
Повышение эффективности производства зимнего бетонирования посредством применения программного обеспечения «Potential-CWC» …… 18

Акиншин Н.С., Петешов А.В., Смыляев Д.Б., Манелюк В.В.
Оценка эффективности поляризационного распознавания малоразмерных наземных объектов при использовании сверхширокополосных радиолокационных сигналов ……..... 27

Житный М.В., Девяткина Т.Ю., Хубларова Т.С., Прохватова И.С.
Методика экспериментального моделирования ударного воздействия имитаторов частиц космического мусора на солнечные элементы космического аппарата ……... 32

Алёшина В.И., Гаврилов С.В., Болотин Ю.С.
Разработка программного модуля автоматизации документооборота в составе САПР «Ковчег» ……... 41

Шпрехер Д.М., Бабокин Г.И., Колесников Е.Б.
Выбор структуры и параметров нейронной сети
для прогнозирования концентрации метана в угольном забое ……... 46

Володин Г.Т., Кочергин Д.С.
Силовое поле при взрыве в воде зарядов конденсированных взрывчатых веществ …… 58

Плут М.Н., Кривцов С.П., Губская О.А.,
Ануфриева О.П., Спиридонов О.Р., Фатьянова Е.В.
К вопросу об электротермической деградации оптического кабеля …… 62

Акиншин О.Н., Мацур И.Ю., Ёркин Д.В.
Модель работы и параметры системы радиочастотной идентификации …… 67

Заика П.В., Агеев П.А., Кудрявцев А.М.
Модель информационных признаков объектов и источников радиомониторинга ……... 78

Гончаров П.С., Житный М.В.,
Копейка А.Л., Синельников Э.Г., Денисов А.М.
Результаты моделирования ударного воздействия малоразмерных частиц на солнечные элементы космического аппарата ……..... 83

Борзенкова С.Ю., Казарина Е.Е.
Анализ методов оценки уровня защищенности информационных систем в процессе их эксплуатации ……... 93

Босова Е.Д., Селищев В.А.
Обеспечение информационной безопасности в банковской системе ……. 98

Губская О.А., Плут М.Н., Спиридонов О.Р., Фатьянова Е.В.
Анализ внешних факторов, влияющих на работоспособность волоконно-оптических системы передач …….. 102

Акиншин О.Н., Полубехин А.И.,
Ёркин Д.В., Карандин Д.Б., Косов К.В.
Методика экспериментальной оценки эффективности работы поляризационного фильтра при приёме информации по двухлучевым каналам связи …….. 108

Богданов М.Б., Прохорцов А.В.,
Савельев В.В., Смирнов В.А., Соловьев А.Э.
Обзор методов комплексирования в интегрированных навигационных системах …… 118

Агеев П.А., Заика П.А., Кудрявцев А.М.
Признаковые характеристики национальных измерительных систем в служебном радиообмене ……..... 126

Копейка А.Л., Дорожко И.В., Кузнецов А.Б.
Имитационная модель процесса контроля автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения в условиях деструктивных внешних воздействий ……... 135

Володин Г.Т., Дуденков Е.А., Кочергин Д.С.
Эффекты воздействий взрыва на малые преграды в воде ……... 148

Есиков О.В., Ёркин Д.В., Чебурков Ю.В., Кулешов А.В.
Методика анализа типовых функциональных органов управления пространственно-распределённых информационных объектов ……. 156

Морозов А.В., Самохвалов А.А., Устинов А.А.
Постановка задачи на разработку математической модели процесса технической эксплуатации средств связи ……. 161

Багрецов С.А., Ачкасов Н.Б., Сиверс М.А., Лаута А.С.
Логико-вероятностный метод расчета живучести информационно-телекоммуникационной сети в условиях комплексного применения средств противодействия …… 170

Селифонтов Д.О., Стариков Н.Е., Науменко И.С.
Исследование конструкционных особенностей современного автоматического огнестрельного оружия с предложением новой перспективной схемы телескопического приклада ……. 178

Проаспэт А.Г., Кравчени М.С., Пахомов Д.А.
Оптимизация методик статистического анализа данных при исследовании показателей агрессивности ……. 187

Петешов А.В., Пыхтункин А.В., Румянцев В.Л., Карандин Д.Б.
Оценка аппаратных затрат на реализацию согласованного фильтра с гауссовой формой импульсной характеристики ……... 191

Румянцев В.Л., Акиншин О.Н., Курбатский С.А.
Методика и схемы обработки радиолокационных сигналов, отражённых от надводных объектов ……. 195

Шеянов Д.Ю., Ключко Н.Ю., Елесин М.Е., Горшков А.А.
Энергетическая эффективность планарных антенн систем фиксированного широкополосного беспроводного доступа …….. 201

Семенов С.С., Губская О.А.
Методика оценки эффективности системы мониторинга технического состояния техники связи ……. 212

Фам Т.Л.
Разработка системы автоматического управления скоростью вращения и подачи долота бурового станка СБШ-250МН-32Т ……. 216

Стась Г.В., Голик В.И., Ковалев Р.А., Апете Гоку Ландри
Выделения радона в атмосферу строящихся тоннелей ……... 224

Бопп В.А.
Типы моделей разграничения доступа …….. 233

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Павлов В.И., Артемова С.В., Грибков А.Н.,
Белоусов О.А., Беляев М.П., Нагорнова И.В.
Раннее обнаружение начала постепенного изменения свойств случайных процессов …….. 237

Бидов Т.Х., Коновалов В.С., Байсякина К.С.
Оптимизация процессов, связанных с производством земляных работ, при строительстве здания методом «UP-DOWN» …… 246

СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ

Афанасьев В.Б.
Особенности проектирования системы информационной поддержки качества продукции оборонного предприятия ……..... 255

Ермилина Д.В., Казандаева С.Н., Сергиенко А.О., Русских И.В.
Инжиниринг качества в концептуальном проектировании 3D-принтера ……. 269

Борискин О.И., Нуждин Г.А., Муравьева И.В., Богомолова С.А.
Метрологическое обеспечение в дорожном хозяйстве ……... 281

Плут М.Н., Чубарев К.С.,
Мякотин А.В., Кривцов С.П., Суслов А.Н.
Показатели оценки качества системы ремонта техники связи и автоматизированных систем управления …….. 293

Высоцкая М.В., Орлова С.И.
Анализ качества стенда на биение тел вращения в авиационно-космической отрасли (АКО) …….. 297

МАШИНОВЕДЕНИЕ, СИСТЕМЫ ПРИВОДОВ И ДЕТАЛИ МАШИН

Груничев А.В., Павлов Д.В., Подъемщиков А.Н., Хмелев Р.Н.
Исследование заключительных этапов технологического процесса получения отливок цилиндров дизелей методом вычислительного эксперимента …… 305

Гадалов В.Н., Гвоздев А.Е., Петренко В.Р.,
Иванов А.А., Филонович А.В., Калинин А.А., Макарова И.А.
Процессы упрочнения и восстановления деталей машин
и механизмов электроакустическим напылением смесью
самофлюсующихся сплавов на никелевой и железной основах ……. 312

Соколов С.А., Тулин Д.Е.
Методика вычисления коэффициента интенсивности напряжений
для трещины в области концентратора напряжений ……... 328

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Куц В.В., Кочергин В.С., Разумов М.С.
Определение параметров срезаемых слоев при проектировании
гранных протяжек ……... 336

Родионова Е.Н.
Технология изготовления корпусов-оболочек с резьбовыми
соединениями ……... 342

Бочкова Д.Е., Бобков М.Н., Золотова С.А.
Обработка круговых зубьев пары цилиндрических колёс
с локализованной зоной касания ……... 344

Гладун А.А.
Технология изготовления формообразующих вставок пресс-форм
методом скоростной гальванопластики …… 350

Решетникова О.П., Изнаиров Б.М.,
Васин А.Н., Белоусова Н.В., Панфилова А.В.
Определение погрешности операционного размера
при бесцентровом шлифовании ……. 355

Серков А.С., Масягин В.Б., Серкова Л.Б.
Исследование напряжённо-деформированного состояния заготовки
зубчатого колеса на математических моделях ……. 362

Гадалов В.Н., Иванов А.А., Макарова И.А.,
Филонович А.В., Калинин А.А., Гвоздев А.Е.
Исследование механических и эксплуатационных свойств
конструкционных сталей с боридными, ционированными
и гальваническими покрытиями …… 374

Щипкова Ю.В.
Анализ методов изготовления стальных гофрированных лент
регенеративного теплообменника ……. 384

Гладун А.А.
Установка скоростного гальванического осаждения металлов …….. 391

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Иванов В.С., Федоров О.М.
Расчетный метод определения нагрузочных характеристик
якорного электропривода ……... 395

Лутонин А.С., Шклярский Я.Э.
Система управления синхронным двигателем с постоянными
магнитамис разомкнутой обмоткой статора и буферным
конденсатором ……. 407

Постников А.А.
Экспериментальное исследование изменения внутреннего
сопротивления свинцово-кислотного аккумулятора ……... 415

Герра Д.Д., Яковлева Э.В., Шклярский Я.Э.
Математическое моделирование электротехнического комплекса
с фотоэлектрическими модулями в климатических условиях
Республики Куба …….. 422

Костин В.Н., Сериков В.А., Кривенко А.В.
Влияние высших гармоник на качество напряжения и на работу
конденсаторных батарей в системах электроснабжения
с нелинейной нагрузкой …….. 431

Постников А.А.
Изменения концентрационных потенциалов вблизи электродов
свинцово-кислотного аккумулятора при поляризации
его переменным током …… 441

Смирнов А.И., Шклярский Я.Э.
Структура токовой защиты распределительной сети на основе
алгоритма поиска кратчайшего пути ……. 445

ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Ларин С.Н., Пасынков А.А., Ларина М.В.
Влияние геометрии деформирующего инструмента
на напряженно-деформированное состояние
при комбинированном выдавливании ……... 451

Пасынков А.А., Матасов И.И., Яковлев Б.С.
Изотермическое деформирование корпусных изделий
с толстым дном в цилиндрическую матрицу …… 457

Гололобова Л.Е.
Анализ процесса обратного выдавливания трубной заготовки
в матрицу квадратного сечения ……. 462

Абрамов С.С.
Исследование величин напряжений и деформаций в детали
при комбинированном выдавливании ……... 466

Гололобова Л.Е.
Оценка сил и деформаций при обратном изотермическом
выдавливании трубной заготовки в матрицу квадратного сечения …... 469

Ларин С.Н., Платонов В.И., Ремнев К.С.
Оптимизированный технологический процесс изготовления
охотничьих гильз ……. 473

Гололобова Л.Е.
Анализ напряженно-деформированного состояния
при комбинированном выдавливании в гладкой цилиндрической
матрице ……. 478

Чижов И.А.
Силовые параметры и износ инструмента при боковом
выдавливании …….. 481

МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ПРОЦЕССЫ

Осипова К.С., Пантюхина Е.В.
Теоретические основы циклограммирования и анализ
производительности роторных котлетоформовочных машин …… 484

Зыкова А.В., Пухова Е.А.
Разработка методики оценки качества изображения, полученного
методом лазерного гравирования на многослойном материале
из поликарбоната ……. 489

Кононова М.И.
Алгоритм методики определения эффективности эксплуатации
магистральных нефтепроводов рациональным использованием
существующего насосного оборудования перекачивающих станций ... 495

Серкова Л.Б., Варепо Л.Г.
Исследование деформационных характеристик конструкции
печатного цилиндра …… 498

Коржев А.А., Войтюк И.Н.,
Смирнов А.И., Иванченко Д.И., Яковлева Э.В.
Моделирование регулируемого синхронного электропривода
насосного агрегата в системе поддержания пластового давления ……. 505

Кондратов А.П., Черкасов Е.П., Утехин А.Н.
Макроструктура анизотропных полимерных пленок
с «памятью формы» ……..... 513

Наумов В.А.
Влияние плотности жидкости, перекачиваемой пищевым
центробежным насосом, на рабочую точку …….. 524

Демьянов О.В.
Микрография на фотопроводящих пленках: фототермопластическая
запись …… 530

Пантюхин О.В., Пантюхина Е.В., Рожкова О.Д.
Расчет двухступенчатых информационных планов контроля
размеров корпуса алюминиевых банок ……. 535

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ

ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 5

Редактор О.И. Борискин

Компьютерная правка и верстка – М.С. Шевков, Б.С. Яковлев

Учредитель:
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97
Подписано в печать 25.05.20. Дата выхода в свет 31.05.20.
Формат бумаги 70×100 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 89,21
Тираж 500 экз. Заказ 061
Цена свободная

Адрес редакции и издателя:
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95

Отпечатано в Издательстве ТулГУ
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95