МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Посвящается
100-летию гражданской авиации России

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ'23

XVIII Международная конференция по электромеханике и робототехнике 18–19 апреля 2023 г.

Сборник докладов

Санкт-Петербург
2023

УДК 001
ББК 72
З-13

З-13 Завалишинские чтения'23: XVIII Международная конференция по электромеханике и робототехнике (СПб., 18–19 апреля 2023 г.): сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2023. 420 с.
ISBN 978-5-8088-1823-1
DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18

Помещенные в сборник доклады отражают результаты научных исследований по решению актуальных проблем развития современной науки и техники: от проектирования отдельных элементов и устройств, технологий их создания, решения вопросов диагностики и разработки прикладного программного обеспечения до построения сложных систем и комплексов, различных по своему функциональному назначению.

Оргкомитет конференции

Председатель оргкомитета конференции

Ю. А. Антохина – доктор экономических наук, профессор, ректор ГУАП

Председатель программного комитета

В. Ф. Шишлаков – доктор технических наук, профессор, проректор по образовательным технологиям и инновационной деятельности ГУАП, директор Института киберфизических систем ГУАП

Члены программного комитета:

С. В. Беззатеев – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационной безопасности ГУАП

М. Б. Сергеев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей ГУАП

С. В. Солёный – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники, директор Инженерной школы ГУАП

А. Ф. Супрун – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора Института кибербезопасности и защиты информации СПбПУ

Д. В. Титов – доктор технических наук, доцент, проректор по науке и международной деятельности ЮЗГУ

Н. Б. Филимонов – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, заместитель заведующего кафедрой, профессор МГУ им. М. В. Ломоносова, профессор МГТУ им. Н. Э. Баумана

Е. А. Фролова – доктор технических наук, доцент, директор Института фундаментальной подготовки и технологических инноваций, главный редактор научного журнала «Инновационное приборостроение» ГУАП

М. И. Хакимьянов – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования предприятий, главный редактор научного журнала «Электрические и информационные комплексы и системы» УГНТУ

Л. И. Чубраева – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заведующая лабораторией электроэнергетики Института электрофизики и электроэнергетики РАН, главный научный сотрудник Института химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН

В. А. Ямщиков – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, руководитель научного направления электроразрядной лазерной техники Института электрофизики и электроэнергетики РАН, Москва

С. Ф. Яцун – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники ЮЗГУ

УДК 001
ББК 72

ISBN 978-5-8088-1823-1
DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18

© Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.032.26 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-3-7**

Е. М. Бадика*
студент
Д. А. Зырянов*
студент
А. П. Бобрышов*
аспирант
В. П. Кузьменко*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБУЧЕНИЯ ДОМАШНЕГО ГОЛОСОВОГО АССИСТЕНТА, ПОСТРОЕННОГО НА БАЗЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Стремительное развитие технологий в последние десятилетия позволило человечеству осуществить множество научных открытий, произвести устройства, позволяющие автоматизировать выполнение сложных и обыденных операций, а также построить новые технологии, охватывающие значительно большую область решения нетривиальных задач. Сегодняшний этап развития носит название «цифровая революция», но в скором времени благодаря появлению новых цифровых технологий ученые прогнозируют переход к четвертой промышленной революции, называемой «киберфизической». Уже в настоящее время в повседневную жизнь человека активно внедряются и используются такие системы, как искусственный интеллект, информационная безопасность, Интернет вещей, большие данные и т. д. К таким технологиям относятся системы умного дома и голосового ассистента, не являющиеся сегодня чем-то новым в использовании для человека. В данной статье описано исследование результатов обучение голосового ассистента, построенного на базе нейронной сети. Производится сравнительная оценка показателей производимого обучения голосового помощника и осуществляется анализ и определение оптимального времени обучения с минимальным значением возникающих ошибок.
Ключевые слова: *нейронная сеть, обучение, ошибка, эпоха, голосовой ассистент, выборка, генерация ответа.*

E. M. Badika*
Student
D. A. Zyryanov*
Student
A. P. Bobryshov*
PhD Student
V. P. Kuzmenko*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

COMPARATIVE EVALUATION OF THE LEARNING INDICATORS OF A HOME VOICE ASSISTANT BUILT ON THE BASIS OF A NEURAL NETWORK

The rapid development of technology in recent decades has allowed mankind to make many scientific discoveries, to produce devices that automate the execution of complex and mundane operations, as well as to build new technologies covering a much larger area of solving non-trivial tasks. The current stage of development is called the «digital revolution», but in the near future, thanks to the emergence of new digital technologies, scientists predict the transition to the fourth industrial revolution called «cyberphysical». Already at present, such systems as artificial intelligence, information security, the Internet of Things, big data, etc. are being actively introduced and used in the daily life of a person. Such technologies include smart home and voice assistant systems, which are not something new in human use today. This article describes the study of the results of training a voice assistant built on the basis of a neural network. A comparative assessment of the indicators of the voice assistant training is carried out and the analysis and determination of the optimal training time with a minimum value of the errors that occur is carried out.
Keywords: *neural network, learning, error, epoch, voice assistant, sampling, response generation.*

Введение

Сегодня интеллектуальные технологии окружают человека во всех сферах деятельности. Главная задача таких систем заключается в автоматизации и помощи при выполнения повседневных операций. Комплекс умный дом относится к технологии, обеспечивающей домашнюю автоматизацию, выполнения повседневных задач без пристального участия человека или вовсе его присутствия. К выполнению таких операций относятся управление инженерными системами, освещения, сигнализацией, контроля утечки воды, бытовых приборов и т. д. Сегодня умный дом использует адаптивные цифровые технологии искусственного интеллекта для наиболее эффективного управления системами дома. Сейчас данная система включает в свой функционал и голосового помощника, выполняющего роль коммуникатора и позволяющего производить голосовые запросы с командами от человека умному дому для наиболее эффективного управления. Ранний прототип данной технологии представлял собой логический алгоритм с довольно скудным функционалом, при этом человеку необходимо было осуществлять управление системой физически настраивая команды на цифровом экране. От понимания голосовым ассистентом фраз человека зависит корректность выполнения задач умным домом, поэтому для наиболее качественной обработки, задача распознавания разделяется на несколько этапов обработки фраз, перевод в цифровой сигнал, отправка данных системе умного дома, генерация ответа и синтез ответа в человеческую речь [1].

Построение голосового помощника на базе нейронной сети

Высокоуровневый язык программирования Python является весьма гибким инструментом в плане составления, реализации систем и практических экспериментов благодаря обширному набору библиотек. При построении голосового ассистента на базе нейронной сети были использованы такие библиотеки, как Numpy – библиотека работы с массивами данных; Tensorflow с модулем keras – библиотека для предобработки данных и создания нейронной сети.

Работа системы голосового ассистента заключается в анализе и распознавании человеческой речи, генерации ответа и перевода текста в звуковой формат. Нейронная сеть, как метод искусственного интеллекта, работает с цифровыми данными, именно поэтому первой задачей в работе с голосовым текстом является предобработка полученных данных при переводе речи в числовой формат. Осуществляется это при помощи лексического анализатора Tokinizer в библиотеке Tensorflow путем обработки текста и расставлении индексов. На рис. 1 приведен пример работы Tokinizer.

Наиболее распространенными словами являются «start» и «end» – это теги, в которые обрамляется ответ нейронной сети, используемый для обучения. Назначение данных тегов

```
[('start', 1), ('end', 2), ('что', 3), ('не', 4), ('а', 5), ('ты', 6), ('я', 7), ('это', 8), ('в', 9),
```

Рис. 1 Пример работы лексического анализатора Tokinizer

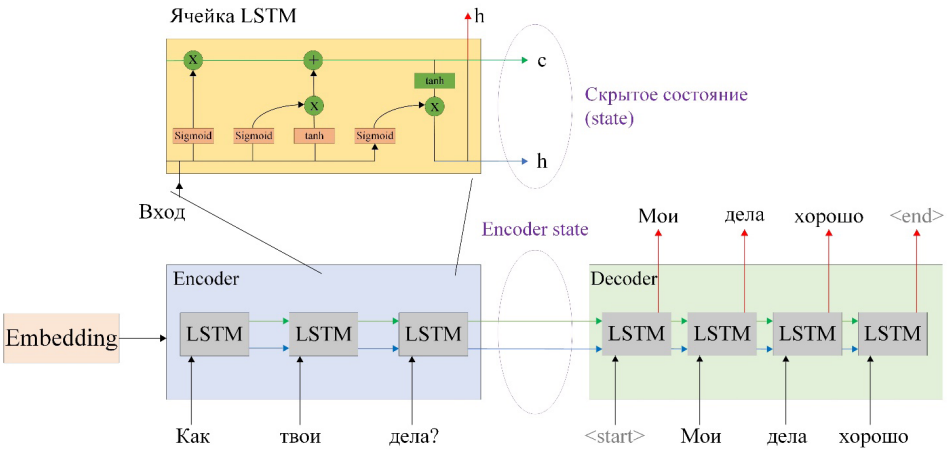


Рис. 2. Архитектура нейронной сети

заключается в необходимости построения конечных предложений, не формируя сплошной набор слов. Для решения задачи обработки текста существует большое количество разнообразных архитектур, например, Sequence-To-Sequense, Sequence-To-Sequense with attention, Transformer и т. д. [2]. В данной статье рассматривается пример использования модели Sequence-To-Sequense по причине значительной простоты работы и наглядности для понимания функционирования нейронной сети. Данная архитектура состоит из двух частей (рис. 2), обучения и практического использования. В процессе обучения на вход encoder подается вопрос из обучающей выборки, а на вход decoder ответ с тегом «start», но без тега «end». Главной задачей decoder получить ответ с тегом «end». После прохождения этапа обучения нейронной сети алгоритм работы encoder выглядит следующим образом:

– на вход первого слоя LSTM подается тег start;

– нейронная сеть производит генерацию первого слова предложения;

– сгенерированное слово подается в следующий слой LSTM;

– подача сгенерированных слов осуществляется до тех пор, пока нейронная сеть не сгенерирует тег end, означающий конец ответа.

Слои долгой и краткосрочной памяти в нейронной сети выполняют функцию обработки полученных данных, осуществляя операции матричного сложения и перемножения, а также функций активации сигмоида и гиперболического тангенса. Достоинством LSTM слоя является возможность возвращения двух состояний: h – хранящий в себе данные конкретного слоя; c – выполняющий роль передатчика последовательного результата работы предыдущих слоев [3]. Такая структура обеспечивает возможность нейронной сети учитывать контекст запроса. Данная технология широко распространена в переводчиках, чат-ботах в случаях, когда необходимо учитывать несколько слов одновременно, при этом фиксируя их как фразовые глаголы или идиомы.

Нейронные сети, созданные для генерации текста, обладают рядом проблем:

– точность модели, зависящая от размера обучающей выборки;

– необходимость учитывать слова, не находящиеся в обучающей выборке;

– необходимость учитывать слова с орфографическими ошибками.

При малом количестве примеров обучающей выборки точность модели возможно повысить расширением данной выборки и осуществлении дообучения модели или использовать алгоритмы обучения без учителя.

Учет слов, не входящих в выборку, возможно путем добавления в Tokenizer параметра oov_token, отвечающего за присвоение словам, находящимся вне выборки значения «unknown», или любого другого в зависимости от того, какое слово подастся в данный параметр. Учитывать слова с орфографическими ошибками, возможно двумя способами – приравниванием слов с ошибками к неизвестным либо созданием базы данных, корректирующей слова, аналогично тому, как данная функция реализована в виде автозамены в смартфонах [4].

Оценка результатов обучения голосового ассистента

В качестве эксперимента было проведено исследование обучения модели генерации текста, построенной на базе нейронной сети. Ассистент обучался на диалогах произведения Абдулина М. Г. «160 страниц из солдатского дневника». На рис. 3 приведены результаты обучения после 100 эпох.

Проведя анализ генерируемого текста, можно сделать вывод, что модель составляет нелогичные ответы на часть запросом. Стоит отметить, что на небольшую часть вопросов ассистент дает логичные, хоть и короткие ответы, например, «Что делаешь» – «ничего» или «Где ты живешь» – «в полку»; по данным ответам можно увидеть связь с обучающей выборкой, которой является диалоги «160 страниц из солдатского дневника».

После 150 эпох видно прогресс в обучении, ответы на задаваемые вопросы перестали состоять из одного слова, стали более внятными (рис. 4). При этом стоит отметить регресс в вопросах, на которые после 100 эпох обучения были даны корректные ответы.

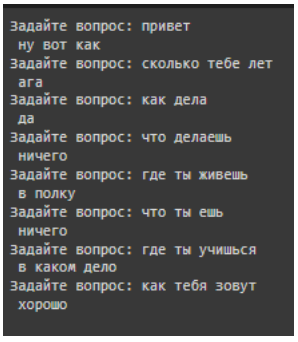


Рис. 3. Результаты обучения нейронной сети после 100 эпох

```
Задайте вопрос: привет
 как вам знаю что это там
Задайте вопрос: сколько тебе лет
 не знаю а сколько нужно
Задайте вопрос: как дела
 да вот уж не знаю
Задайте вопрос: что делаешь
 ничего
Задайте вопрос: где ты живешь
 под
Задайте вопрос: что ты ешь
 не надо
Задайте вопрос: где ты учишься
 я в знаю где ж
Задайте вопрос: как тебя зовут
 меня
```

Рис. 4. Результаты обучения нейронной сети после 150 эпох

```
Задайте вопрос: привет
 привет тебя зовут зовут не как все было
Задайте вопрос: сколько тебе лет
 не знаю а сколько нужно
Задайте вопрос: как дела
 за ночь пятнадцать пятнадцать пятнадцать нет
Задайте вопрос: что делаешь
 не да
Задайте вопрос: где ты живешь
 под что
Задайте вопрос: что ты ешь
 не знаешь
Задайте вопрос: где ты учишься
 я в а а я то тебе какое же
Задайте вопрос: как тебя зовут
 меня
```

Рис. 5. Результаты обучения нейронной сети после 280 эпох

```
Задайте вопрос: что ты умеешь
 немного умею
```

Рис. 6. Пример корректного ответа на заданный вопрос в результате обучения нейронной сети после 400 эпох

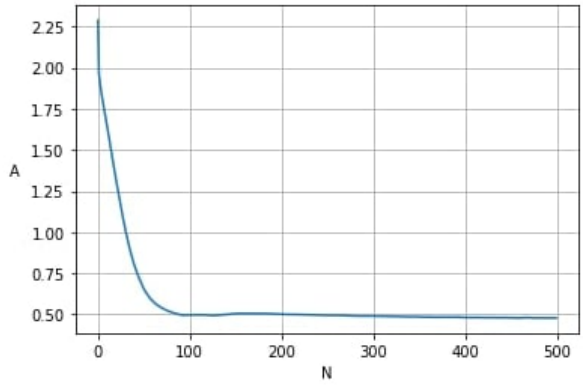


Рис. 7. График ошибки в результате обучения ассистента за 500 эпох

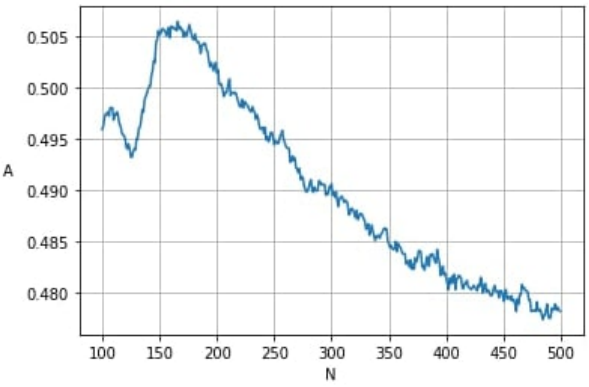


Рис. 8. График ошибки в результате обучения ассистента за период 100–500 эпох

Спустя 280 эпох обучения текст модели не стали более внятным, практически все ответы претерпели изменения, носящие регрессивный характер (рис. 5). Данный факт обусловлен тем, что одно произведение является достаточно малой выборкой, включающей 10 000 примеров, для обучения нейронной сети.

Стоит отметить показатель ошибки: после 100 эпох ассистент показывает значение меньше 0.5, что свидетельствует о хорошем ходе обучения и тенденции к высоким показателям работы модели, если продолжить обучение дальше.

По результатам проведенного эксперимента можно сделать вывод, что повышение количества эпох обучения при малом значении выборки носит неравномерный характер, ответы могут стать более развернутыми и внятными или, наоборот, ухудшиться в результате переобучения. В качестве примера стоит рассмотреть внятный ответ нейронной сети на запрос после 400 эпох обучения (рис. 6).

Для наиболее наглядной оценки стоит оценить количественный показатель ошибки нейронной сети от времени обучения. За 500 эпох обучения модель достигла ошибки в 0.4782, это говорит о том, что для дальнейшего снижения ошибки необходимо обучение гораздо дольше, потому что ошибка снижается незначительно, но плавно и без тенденции к переобучению.

На графике рис. 7 представлена зависимость ошибки от времени обучения: A – ошибка, N – количество прошедших эпох. В результате анализа графика можно сказать, что минимальным временем обучения нейронной сети для значительного снижения ошибки до 0.5 стоит устанавливать минимум 80–100 эпох [5]. Причиной такого спада является большое изменение коэффициентов при изменении весов во время градиентного спуска. Для наиболее точного анализа стоит рассмотреть подробнее обучение от 100 до 500 эпох. На рис. 8 представлен график оценки показателя ошибки от времени обучения [6].

Рассматриваемый график наглядно показывает прогресс обучения ассистента:

– достижение оптимального значения ошибки около 0.5 для получения внятных ответов от нейронной сети возможно за 100 эпох;

– со 100 эпох идет снижение ошибки значительно медленнее, примерно 0.005 за 100 эпох;

– переобучение модели маловероятно, так как график имеет плавную структуру;

– с 100-й эпохи есть небольшой скачок ошибки, причиной которой является локальный минимум, который был преодолен на 200-й эпохе, после чего характер обучение стал более стабильным;

– присутствует незначительная пила графика, не влияющая на четкую тенденцию к снижению показателя ошибки [7].

Выводы

Нейронные сети на сегодняшний день являются значительно распространенной и используемой технологией в жизни человека, они применяются в сфере Интернета вещей, переводчиках, голосовых помощниках, составлении и формировании баз данных и т. д. По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы. Генерация текста при помощи использования технологии нейронной сети удовлетворяет требования к показателям ошибки генерируемых ответов и может использоваться в такого рода областях, но при этом необходимо соблюдать несколько правил при работе с данной технологией. Для наиболее высокой точности модели необходимо использовать большую обучающую выборку, большое количество времени для обучения, высокие мощности компьютерной техники или стабильное и высокоскоростное подключение к облачным вычислительным машинам.

Согласно динамике снижения показателя ошибки по результатам графика можно сказать, что при обучении модели после 1500 эпох возможно достигнуть показателя ошибки на уровне 0.4, данная компиляция в среднем займет около 15 часов, после чего нейронная сеть сможет генерировать более качественные ответы на поставленные вопросы. Однако стоит заметить, что дальнейшее снижение показателя ошибки будет проходить значительно медленнее и глобальных изменений в работе модели не приведет. Для ее улучшения необходимо расширение обучающей выборки.

Список источников

1. *Шовин В. А.* Программа chatbot – чат-бот или виртуальный собеседник // Математические структуры и моделирование. 2016. С. 96–101.

2. *Кривошеев Н. А., Иванова Ю. А., Спицын В. Г.* Автоматическая генерация коротких текстов на основе применения нейронных сетей lstm и seqgan // Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 57.

3. *Zhaolin T., Weiwei Z.* Sequence-to-sequence based english-chinese translation model // Информатика, телекоммуникации и управление. 2018. № 2.

4. *Немальцев А. С.* Использование рекуррентных нейронных сетей для анализа необработанного многоязычного текста // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2020. № 6-2.

5. *Чупакова А. О., Гудин С. В., Хабибулин Р. Ш.* Разработка и обучение модели искусственной нейронной сети для создания систем поддержки принятия решений // Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 3.

6. *Чернобаев И. Д., Суркова А. С., Панкратова А. З.* Моделирование текстов с использованием рекуррентных нейронных сетей // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2018. № 1 (120).

7. *Гринин И. Л.* Работа модели генерации текста с помощью нейронных сетей как составной системы: модульный анализ. Модуль третий. Нейронные сети – структура и машинное обучение // Инновации и инвестиции. 2020. № 9.

УДК 342 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-8-10**

В. С. Беззатеева*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И НОРМАТИВНО-ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ ЗАЩИТЫ ДЕТЕЙ ОТ НЕЖЕЛАТЕЛЬНОГО КОНТЕНТА

Рассмотрены вопросы обеспечения защиты детей от нежелательного контента в сети Интернет, возможность использования искусственного интеллекта для защиты несовершеннолетних в сети Интернет.
Ключевые слова: *права ребенка, защита детей, безопасность несовершеннолетних, информационная безопасность, искусственный интеллект, безопасное Интернет-пространство, обеспечение безопасности несовершеннолетних в сети Интернет.*

V. S. Bezzateeva*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND REGULATORY ASPECTS OF PROTECTING CHILDREN FROM INAPPROPRIATE CONTENT

The issues of ensuring the protection of children from unwanted content on the Internet, the possibility of using artificial intelligence to protect minors on the Internet are considered.
Keywords: *rights of the child, protection of children, safety of minors, information security, artificial intelligence, safe Internet space, ensuring the safety of minors on the Internet.*

Введение

Одним из очевидных и к настоящему времени достаточно хорошо разработанных требований задач в системах защиты от вредоносного контента, имеющегося в общедоступном источнике, является идентификация и аутентификация пользователя. Очевидно, что для предотвращения доступа ребенка к вредоносной информации необходимо определить соответствие его возраста уровню запрашиваемой им информации. Маркировка уровня информации осуществляется с использованием различных методов, в том числе добавлением соответствующих метаданных, вставкой цифровой метки и т. д. Для идентификации пользователя также предлагается большое количество способов, например, использование персонального аккаунта, закрепление фиксированного IP-адреса, номера телефона и т. д. При всех вышеперечисленных задачах необходимо, чтобы идентификация не происходила посредствам сбора биометрических данных, дабы не допустить утечку таких данных по незащищенным каналам. Одним из наиболее известных проектов на территории Российской Федерации, использующих биометрические данные несовершеннолетних стала система безналичного расчета за питание в школах – «Ладошки», реализуемая при поддержке ПАО «Сбербанк России». Согласно данной системе по отпечатку руки школьника, приложенной к специальному терминалу в столовой, списываются средства с его счета на оплату обеда или покупки в буфете. Проведя анализ данной системы, можно сделать вывод, что для ее функционирования идет сбор избыточных конфиденциальных данных в рамках реализации заявленных задач [1].

Одним из удобных и эффективных способов считается метод аутентификации ребенка по его карте школьника. Карта школьника – это идентификатор пользователя, который содержит информацию – ключ, открывающий доступ к ресурсам и необходимому контенту в соответствии с возрастом [2].

Проблема фильтрации контента и возможные направления ее решения

Современный мир сложно представить без бесконтактной идентификации и коммуникационных технологий. Однако вопрос фильтра-

ции контента как пригодного или не пригодного для несовершеннолетнего до сих пор не решен. Так, еще в 2018 году сотрудники Лаборатории проблем компьютерной безопасности СПИИРАН в рамках гранта, поддержанного Российским научным фондом (заявка № 18-11-00302), разработали интеллектуальную систему аналитической обработки цифрового сетевого контента [3]. Целью программного обеспечения является выявление нежелательной, подозрительной и вредоносной информации и противодействие ей: система самостоятельно анализирует страницы и решает, есть ли на них нежелательный контент.

В рамках проекта планируется разработать концепцию виртуального помощника, способного не только скрывать потенциально опасные результаты поиска, но и отвлекать ребенка от информации, не предназначенной для него в игровой форме, а также неощутимо для несовершеннолетнего потребителя направлять последнего на другие веб-сайты, наиболее подходящие соответствующей возрастной категории. Также в данную разработку можно дополнительно включить развитие сильных сторон ребенка или же реализовать решение задачи ликвидации пробелов в знаниях ребенка посредством анализа потребляемой информации и предоставления необходимых ресурсов для дальнейшего обучения.

Летом 2021 года в Российской Федерации был создан первый в стране программный комплекс «защита будущего» по защите личности от Интернет-рисков и оказания психологической помощи онлайн, разработанный правительством Санкт-Петербурга совместно с аппаратом уполномоченного при президенте России по правам ребенка и Агентством стратегических инициатив, который проводит аналитику в социальных сетях в Интернете, выявляет среди пользователей «группы смерти» или подростков с суицидальными наклонностями [4]. На данный момент в России суицид среди причин гибели несовершеннолетних находится на третьем месте, в том числе нарастает тенденция активного смещения преступлений против детей в Интернете [5]. Разработанный комплекс включает мониторинг, анализ, выявление факторов негативного влияния цифровой среды на молодежь, выявление суицидального и депрессивного контента при помощи программы искусственного интеллекта.

В настоящее время в рамках вышеуказанного проекта разработано несколько вариантов программного обеспечения. В частности, программа, основанная на технологии искусственного интеллекта, которая осуществляет предварительную обработку, анализ и ранжирование информации. Она позволяет оценить степень суицидальной наклонности субъекта на основании контента, получаемого из сети Интернет и из наиболее популярных среди российских детей и подростков социальных сетей.

Также предусмотрено оперативное реагирование: блокирование контента и помощь в острых случаях, кроме того, в перспективе возможно обучение системы на искусственном интеллекте поиску по определенным маркерам пользователей, интересующихся скулшутингом («колумбайн»), и тех, кто проявляет нездоровый интерес к детям или иные опасные для подрастающего поколения наклонности.

При отсутствии идентификации пользователя необходимо законодательно закрепить и обосновать разрешение распространения контента, представляющего возможно опасность для несовершеннолетних, посредством медиауслуг, только в том случае, если их провайдер может гарантировать, что доступ к такому контенту будет только у взрослых, по аналогии с Германией, где существует KJM – основной надзорный орган, отвечающий за защиту несовершеннолетних от неподобающих материалов на частных федеральных телеканалах и в Интернете.

Также интересен опыт Китайской Народной Республики, где существует множество законов, защищающих детей от вредоносного контента. Существует обязательная процедура проверки и подтверждения личности игрока в онлайн-видеоиграх. Дети, не достигшие возраста для потребления конкретного контента в соответствии с системой маркировки, не могут продолжать играть в такие видеоигры. Проверка возраста осуществляется с помощью общедоступной государственной системы идентификации пользователей. Кроме того, мера была реализована для ограничения времени, которое несовершеннолетние граждане Китая (возраст совершеннолетия – 18 лет) проводят за онлайн-видеоиграми. Если после прохождения обязательной процедуры подтверждения личности будет выявлено, что игрок не достиг возраста 18 лет, то он сможет играть не более полутора часов в будние дни и не более трех часов в выходные [6].

В Российской Федерации на данный момент существует несколько нормативных актов, регулирующих оборот разного рода информации, в том числе информации, оказывающей аддиктивное влияние на несовершеннолетних. Так, положения Федерального закона от 29.12.2010 № 436-ФЗ «О защите детей от информации,

причиняющей вред их здоровью и развитию» (далее – Закон № 436-ФЗ) распространяются в том числе на контент, распространяемый в сети Интернет. Помимо указанного базового закона, в российском законодательстве существует целая система различных законодательных актов, которые были приняты в целях реализации защиты детей в Интернете. К примеру, 1 февраля 2021 года вступили в силу изменения в ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации», которыми вводятся новые обязанности для социальных сетей в отношении контроля за опасным контентом. Кроме того, каждая социальная сеть с 2022 года должна публично отчитываться о результатах деятельности по выявлению и блокировкам социально опасного контента согласно Приказу Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций от 02.04.2021 № 47 «Об утверждении требований к форме, составу и размещению ежегодных отчетов о результатах рассмотрения обращений, поданных с использованием электронной формы для направления обращений о распространяемой с нарушением закона информации». Кроме того, Приказом Роскомнадзора от 02.04.2021 № 45 «Об утверждении требований к электронной форме для направления обращений о распространяемой с нарушением закона информации» установлены требования к электронной форме для направления жалоб пользователей на опасную и незаконную информацию.

Заключение

Подводя итог, необходимо сказать, что на данный момент не существует единообразного подхода к определению вредоносного контента и к правовому регулированию ограничения распространения такого контента в государствах и межгосударственных объединениях мира. Основными механизмами защиты детей от вредоносного контента являются фильтрация и возрастная категоризация контента, которую возможно сделать при идентификации пользователя в сети. Такие механизмы устанавливаются как в соответствии с законодательными требованиями некоторых государств, так и частными компаниями. При расширении действия механизмов, используемых для борьбы с незаконным контентом (например, автоматическая/ручная фильтрация), необходимо соблюдать баланс между общественными интересами, в том числе детей, и свободой выражения мнений.

Список источников

1. *Беззатеева В. С.* Использование идентификационной карты для защиты несовершеннолетнего от деструктива и других угроз в сети Интернет // Социотехнические и гуманитарные аспекты информационной безопасности. Материалы III Всерос. научно-практ. конф. Пятигорск: ПГУ, 2022. С. 24–27.

2. *Беззатеева В. С.* Сохранность и защита персональных данных несовершеннолетних в социальных сетях // Научная сессия ГУАП. Гуманитарные науки. 2022. С. 143–144.

3. Сайт Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук. URL: http://www.spiiras.nw.ru/ru/scientific-activity/research-units/laboratory-of-problems-of-computer-security.html (дата обращения: 12.01.2023).

4. Искусственный интеллект спасет детей от суицида. URL: https://www.securitylab.ru/news/523402.php (дата обращения: 12.01.2023).

5. *Беззатеева В. С.* Организационно-правовая защита несовершеннолетних от деструктивной информации в цифровом пространстве// Закон. Право. Государство. 2022. № 4.

6. Правовое регулирование защиты несовершеннолетних пользователей сети Интернет от вредоносного контента. URL: https://rdc.grfc.ru/2021/08/minors_law_protection/ (дата обращения: 11.01.2023).

УДК 004.056.53 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-11-13**

Д. А. Березкин*
магистрант
Ю. А. Ганьшин*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

КОНЦЕПЦИЯ ЕДИНОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ СЕТИ СВЯЗИ ВНУТРИ СТРАНЫ

Рассматривается концепция использования единой национальной сети внутри страны. Излагается основная идея концепции, определяется структура сети и обозначается ее практическое применение. Указывается на важность внедрения такой сетевой инфраструктуры на этапе цифровизации страны.
Ключевые слова: *национальная сеть, Интернет, государство, структуры, информационная безопасность.*

D. A. Berezkin*
Postgraduate Student
Y. A. Ganshin*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE CONCEPT OF A UNIFIED NATIONAL COMMUNICATION NETWORK WITHIN THE COUNTRY

This article discusses the concept of using a single national network within the country. The basic idea of the concept is stated, the structure of the network is defined and its practical application is indicated. The importance of the introduction of such a network infrastructure at the stage of digitalization of the country is pointed out.
Keywords: *national network, Internet, state, structures, information security.*

На сегодняшний день самым популярным способом передачи и получения информации является использование сети Интернет. Обратимся к недостаткам самой обширной глобальной компьютерной сети, которые с каждым годом становятся выражены все ярче, опровергая тем самым различные заявления, что Интернет децентрализован в своем управлении и не находится под влиянием какого-либо определенного государства [1]. Рассматривая Интернет с точки зрения информационной безопасности, стоит отметить, что в стране, в которой он развернут, имеется значительный потенциальный риск состоянию информационной безопасности [2].

В настоящее время в нашей стране просто невозможно развернуть альтернативную глобальную сеть, к которой смог бы подключиться каждый компьютер любой гражданской или государственной службы. Это связано с целым рядом проблем, начиная с плохо организованной сетевой топологии и заканчивая отсутствием концептуальных предложений. На текущий момент возможно только перевести критически важные государственные объекты на альтернативные внутренние сети связи.

Рассмотрим сети связи специального назначения на основе публичной информации. Такие сети имеют возможность помимо телефонной связи выполнять функцию организации среды для передачи данных по принципу Интранета [3]. К сожалению, из-за отсутствия тенденции к дальнейшему развитию этой функции она не позволяет потенциально раскрыть возможности приема и передачи данных, используется в качестве предпочтительной защищенной телефонной связи. В настоящее время подавляющее большинство государственных и гражданских структур используют иностранную сеть связи и зависят от нее. Для государства сейчас возможно задать новый вектор развития по внедрению единой национальной сети связи. Благодаря заданному вектору развития является возможным начать модернизацию всей сети связи начиная с государственных структур и заканчивая гражданскими сетями связи.

Подразумевая модернизацию какого-либо государственного объекта, необходимо понимать, что важным шагом станет решение дополнительного контроля над сотрудниками, которые также обязаны взаимодействовать толь-

ко с национальной сетью связи, обеспечивая целостную информационную изоляцию такого объекта. Практическое тестирование избирательных объектов поможет отладить работу национальной сети связи, собрать статистику и протестировать экспериментальные функции и решения. После полноценного развертывания национальной сети связи во всех государственных структурах возможно внедрение такой сети в гражданские структуры. Важно понимать, что основной идеей единой национальной сети является односторонний обмен информацией, то есть получение необходимой для страны информации. Если изоляция государственных структур является прямым вопросом информационной безопасности, то использование такой сети на гражданских структурах зависит от идеологического подхода государства. При упрощенном сценарии перехода всей страны на единую национальную сеть можно избежать риска негативной окраски повестки дня, которая может привести к повышению общественного возмущения. Развертывание такой сети может носить чисто превентивный характер и обеспечит гарантию поддержания связи по всей стране, независимо от внешних воздействий на страну.

При разработке единой национальной сети является возможным опираться на довольно успешную реализацию сети «Кванмен» [4] и проекта «Золотой щит» [5]. Руководствуясь приведенными примерами, представляется возможным создать модифицированную единую национальную сеть.

При разработке единой национальной сети с инфраструктурной стороны, прежде всего, необходимо провести различие между государственными и гражданскими структурами и обозначить глобальную топологию всей системы сети. Единая национальная сеть представляется централизованной и иерархичной в глобальном плане, а регулирующий сектор будет выступать в качестве ядра системы. Такой сектор изначально предопределит и разграничит дальнейшие цепочки связи. Регулирующий сектор состоит из основного регулятора и двух второстепенных регуляторов. Основной регулятор отвечает за управление двумя второстепенными регуляторами, а также за сбор и хранение критической и любой другой конфиденциальной информации. Второстепенные регуляторы проводят техническое различие между государственными и гражданскими структурами, изолируя и управляя каждой из них. Затем в зависимости от выбранной цепочки идут непосредственно государственные или гражданские структуры. Государственные структуры включают в себя компьютеры организаций сектора государственного управления и государственных корпораций. Гражданские структуры включают в себя гражданские персональные компьютеры, а также электронные вычислительные машины среднего и малого бизнеса.

Разбирая второстепенные регуляторы, нужно понимать, что каждая отдельно выстроенная цепочка от основного регулятора имеет радикально отличающиеся подходы и идею работы во всей системе связи. Если принять во внимание цепочку от основного регулятора до государственных структур, то здесь подразумевается полностью самодостаточная и изолированная связь. В такой цепочке недопустимы сторонние коммуникации и иностранное влияние. Такая связь полностью обозначена в политики сети «Кванмен» [4]. Внутри государственных структур действуют правила сети Интранет, а любая информация полностью регулируется и сохраняется второстепенным регулятором. Любые компьютерные соединения предопределяются и устанавливаются второстепенным регулятором, а информация, запрашиваемая от регулятора, является статической и полностью регулируемой. В случае связи от основного регулятора к гражданским структурам стоит уделить внимание второстепенному регулятору. Работа этой цепочки основана на проекте «Золотой щит». Возвращаясь к второстепенному регулятору, стоит отметить, что помимо функциональности сохранения и регулирования полученной информации, существует функционал фильтрации полученной внешней информации. В зависимости от политики государства информация, полученная из внешних источников, может регулироваться и фильтроваться различными способами для дальнейшей передачи в систему. В дополнение к фильтрации полученной информации вторичный регулятор отвечает за фильтрацию информации, поступающей из системы, при условии соответствующего идеологического подхода государства. В цепочке с таким регулятором все соединения между электронными вычислительными машинами, а также любая информация приобретают динамический характер. Но все переменные полностью технологически регулируются, это означает, что регулятор имеет режимную особенность. Оба второстепенных регулятора хранят и обрабатывают полученную информацию и по первому запросу отправляют всю необходимую информацию основному регулятору.

При переходе к национальной сети связи можно выделить ряд положительных аспек-

тов. Прежде всего, это гибкое практическое развертывание такой сети. Разработка такой сети предполагает к модификации текущей сетевой инфраструктуры, и нет необходимости начинать все с нуля. Используя национальную сеть, государство больше не будет находиться в подвешенном технологическом состоянии, гарантируя стабильную связь для гигантского количества подключения компьютеров. Такой подход обеспечит среду контролируемой информации, сохранение государственных интересов и четкое определение гражданских и государственных структур, что приведет к повышению информационной безопасности. Решение прибегнуть к национальной сети проложит путь к повышенному контролю иностранных компаний внутри страны.

Список источников

1. Russia, Blocked From the Global Internet, Plunges Into Digital Isolation. URL: https://www.nytimes.com/2022/03/07/technology/russia-ukraine-internet-isolation.html (дата обращения: 06.07.22).

2. *Зиновьева Е. С.* Международное управление Интернетом: конфликт и сотрудничество. М.: МГИМО, 2011.

3. Федеральный закон «О связи» от 07.07.2003. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_43224/ (дата обращения: 06.07.22).

4. Yle Pohjois-Koreassa: Kurkista suljetun maan omaan tietoverkkoon. URL: https://yle.fi/uutiset/3–8882096 (дата обращения: 06.07.22).

5. 金盾工程. URL: https://web.archive.org/web/20200221173946/http://www.china.com.cn/chinese/zhuanti/283732.htm (дата обращения: 08.07.22).

УДК 004.056.53 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-14-17**

Д. А. Березкин*
магистрант
Ю. А. Ганьшин*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ В СТРАНЕ

Эта статья содержит предложения по управлению персональными данными внутри страны, которая находится на стадии активной компьютеризации. Обращается внимание на текущие проблемы и возможные риски, которые могут возникнуть, если не уделять должного внимания информационной безопасности.
Ключевые слова: *персональные данные, конфиденциальность, государство, информация, компании, информационная безопасность.*

D. A. Berezkin*
Postgraduate Student
Y. A. Ganshin*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE CONCEPT OF PERSONAL DATA MANAGEMENT IN THE COUNTRY

This article contains proposals for the management of personal data within the country, which is at the stage of active computerization. Attention is drawn to the current problems and possible risks that may arise if due attention is not paid to information security.
Keywords: *personal data, confidentiality, government, information, companies, information security.*

В современном мире технический прогресс позволяет собирать все более точные данные о различных объектах, осуществлять множество современных подходов к автоматизации и хранению этих данных. Если в области сбора различной информации нет недостатков, то в области автоматизации и хранения этих данных с точки зрения информационной безопасности имеются серьезные недостатки. Компании, которые используют и разрабатывают технологии сбора информации для различных целей, как правило, не уделяют должного внимания качеству хранения такой информации [1]. Говоря об информации, стоит понимать, что речь идет не только о неодушевленных предметах окружающего человека мира, но и о самом человеке. На данный момент подавляющее большинство компаний берут человека в качестве источника информации, а использование технологий направлено на структурированный сбор информации о нем, что делает собранные данные персональными [2].

Становление работы с человеком как источником информации в цифровой среде следует связывать с цифровой революцией, которая активно происходила, начиная со второй половиной двадцатого века [3]. Благодаря возросшим темпам развития технологий стало возможным взаимодействовать с информацией различного рода. Речь идет не только о различного рода разнообразии информации, но и о росте ее обширности. Стали возникать вопросы не только о качестве собираемой информации и ее хранении, но и о ее распространении. И если первые два вопроса выше сыграли ключевую роль в формировании «Больших данных», то последний вопрос создал ответвление из области сбора информации, что привело к формированию «экономики конфиденциальности» [4]. Проще говоря, сформировался рынок торговли персональными данными, в котором принимают участие различные компании. Место человека в этой области – служить основным источником прибыли для компаний, которые производят и продают товары, состоящие из персональной информации [5]. В настоящее время крупнейшей компанией, собирающей персональные данные людей, является Google. На примере этой компании возможно рассмотреть, как компаниям в настоящее время разрешено собирать

различные пользовательские данные и как разные страны не заинтересованы в безопасности персональных данных своих граждан [6]. Пользуясь вседозволенностью, крупные компании устанавливают свои собственные правила обработки персональных данных, продолжая формировать рынок персональных данных.

В этом вопросе государство должно понимать, что такая информация является конфиденциальной и напрямую влияет на определение информационной безопасности страны. Роль государства в этом вопросе, казалось бы, заключается в регулировании сбора и хранения такой конфиденциальной информации, но на практике все обстоит иначе. Возвращаясь к компаниям, которые собирают персональную информацию, важно понимать, что их не только большое количество, но и все они имеют разное происхождение. К сожалению, на данный момент государство не проводит различий между иностранными и отечественными компаниями с точки зрения разрешения на сбор личной информации и не оказывает существенного влияния на регулирование конфиденциальной информации в стране [7]. Такое прохладное отношение государства к этому вопросу создает огромные риски возможного иностранного влияния, утечки данных в открытый доступ, а главное, использования скомпрометированных данных против страны и ее граждан, что влечет за собой беспрецедентные случаи подрыва информационной безопасности страны в будущем. Заинтересованное государство в вопросе защиты информации должно смотреть в корень источника потенциальной проблемы. Преобладающим элементом такого источника будут ранее упомянутые компании [8].

Прежде всего, стоит обратить внимание на отсутствие какого-либо строго регламентирующего документа, который устанавливал бы стандарт собираемой информации для разных компаний в стране. В зависимости от предоставляемых услуг любая компания сама решает, какие данные она может потребовать от человека ввести в своей среде для получения или предоставления таких услуг [9]. В дополнение к сбору стандартных персональных данных стоит помнить, что любое программное обеспечение, которое установлено на любом типе устройства потенциального пользователя, также может дополнительно собирать любые данные, используя весь функционал такого устройства [10]. Бывают случаи, когда компания собирает избыточную информацию от потенциального пользователя, которая никоим образом не пересекается с функциональностью используемого продукта или услуги, и такой сбор данных ничем не оправдан [11]. Из-за отсутствия четкого стандарта сбора данных разные компании собирают данные так, как считают нужным, в связи с этим получается произвольный массив собранных персональных данных, и в общей сложности собранные данные всех компаний хаотичны.

Важно учитывать не только то, какую информацию собирают компании, но и то, как они ее собирают. Подавляющее большинство сервисов и компаний имеют свой собственный процесс идентификации пользователя, но все они используют анкетный подход для подавляющего количества информации, которую необходимо запросить у пользователя. Предоставляемые сервисы работают таким образом, что они просят пользователя заполнить основную информацию о себе для корректной работы сервиса [12]. Все информационное наполнение происходит, как правило, в собственной среде, которую предоставляет компания или сервис, и, казалось бы, компания должна взять на себя качество передачи введенной в нее информации. В действительности пользователь соглашается с рисками использования небезопасной среды передачи информации, и ни одна компания не гарантирует качество передачи таких данных с устройства пользователя в место хранения информации внутри компании. Если говорить о побочной информации, которая собирается в автоматическом режиме с устройства пользователя, например, при использовании программного обеспечения, то обычно компания не считает нужным информировать пользователя о том, что сбор данных происходит [13]. Такой сбор данных происходит в фоновом режиме, и процесс сбора полностью не защищен от внешнего вмешательства и кражи данных, потому что такой процесс происходит в динамической среде, и все взаимодействия в системе устройства не могут быть предсказаны, поэтому процесс может иметь только условную защиту. Защита может вообще не предоставляться, поскольку такое решение полностью зависит от самой компании или сервиса.

Рассмотрим вопрос хранения информации. Огромное количество компаний используют серверы для хранения информации. Если компания использует свои собственные серверы, то компания несет полную ответственность за процесс хранения данных и защиту текущей информации. Учитывая, что не существует единого стандарта хранения всей полученной информации, компания определяет такой стандарт внутри себя. Исходя из частного мнения

руководства некоторым вопросам сохранения информации может уделяться недостаточное внимание, начиная от неправильного процесса структурирования данных и заканчивая доступом к конфиденциальным данным определенных сотрудников или лиц, занимающих определенную должность [14].

Вопрос об использовании компанией полученных данных остается открытым. На данный момент в стране нет стандарта, который бы задавал вектор разрешения компаниям использовать данные в определенных целях. Например, можно рассмотреть продукт «Tinkoff ID». Компания реализовала собственный сервис авторизации для партнерских сайтов и приложений [15]. Проще говоря, компания взяла на себя ответственность за дублирование и распространение данных в тех местах, где она считает нужным. И, несмотря на согласие конечного пользователя, данные уже структурированы и обработаны таким образом, чтобы быть готовыми к распространению. Разработка различных алгоритмов и процессов обеспечения безопасности носит частный характер, и этот метод передачи данных не был рассмотрен или одобрен на государственном или законодательном уровне. Такие действия создают потенциальный риск утечки данных и возможного облегчения работы злоумышленников.

Помимо прочего, государство разрешает полностью иностранным компаниям работать на своей территории. На данный момент государство только начало пытаться контролировать крупные IT-компании, взять, к примеру, закон о «приземлении» [16], но все же государство не может полностью контролировать поток персональной информации, который поступает в иностранные компании. На данный момент государство не может обеспечить локализацию персональных данных своих граждан, создавая риск компрометации персональных данных. Один из последних ярких примеров компрометации данных был продемонстрирован Yandex, когда компания не уделила достаточного внимания процессу предоставления определенным сотрудникам доступа к конфиденциальным данным, из-за сотрудника данные просочились в открытый доступ [17]. Сейчас различные компании буквально сами решают, какие данные они хотят собирать, какой метод сбора данных использовать, как их структурировать и хранить. Государство же ежедневно увеличивает риск потенциальных беспрецедентных случаев утечки данных в открытый доступ.

Предлагается разработать систему централизованного хранения конфиденциальной информации, разработать стандарты обращения с такой информацией, которые могло бы использовать государство.

Подход к разработке системы централизованного хранения конфиденциальной информации можно найти в Северной Корее. Стандарты, принятые государством, обозначили правила обращения с информацией внутри страны [18]. Благодаря уникальному централизованному подходу и повышенному вниманию к мониторингу сети уровень безопасности на этапах сбора и хранения информации намного выше, чем в других странах мира. Политика такого государства вынуждает не только национальные, но и иностранные IT-компании, работающие внутри, безопасно обращаться с персональной информацией. Благодаря таким мерам снизится риск утечки данных, повысится национальная информационная безопасность страны, а другие компании будут более тщательно обращаться с персональными данными.

Список источников

1. The 65 Biggest Data Breaches (Updated June 2022). URL: https://www.upguard.com/blog/biggest-data-breaches (дата обращения: 25.07.2022).

2. How Businesses Are Collecting Data (And What They're Doing With It). URL: https://www.businessnewsdaily.com/10625-businesses-collecting-data.html (дата обращения: 25.07.2022).

3. The Digital Revolution. URL: https://web.archive.org/web/20081007132355/http://history.sandiego.edu/gen/recording/digital.html/ (дата обращения: 11.06.2022).

4. The World's Technological Capacity to Store, Communicate, and Compute Information. URL: http://www.martinhilbert.net/WorldInfoCapacity.html/ (дата обращения: 25.07.2022).

5. The Economics of Privacy. URL: https://www.law.berkeley.edu/wp-content/uploads/2015/11/The-Economics-of-Privacy.pdf (дата обращения: 25.07.2022).

6. Google tracks 39 types of personal data, Apple tracks 12. URL: https://appleinsider.com/articles/22/08/25/google-tracks–39-types-of-personal-data-apple-tracks-12 (дата обращения: 25.07.2022).

7. Иностранные IT-компании не спешат «приземляться» в РФ и не говорят о намерениях. Обзор. URL: https://www.interfax.ru/russia/817718 (дата обращения: 14.05.2022).

8. 45 % of businesses owners have faced 'major data breach' – with a third being an inside job. URL: https://studyfinds.org/cybersecurity-breach-personal-data/ (дата обращения: 25.07.2022).

9. Facebook value drops by $37bn amid privacy backlash. URL: https://www.bbc.com/news/business-43462423 (дата обращения: 25.07.22).

10. Third Party Tracking in the Mobile Ecosystem. URL: https://arxiv.org/pdf/1804.03603.pdf (дата обращения: 23.07.2022).

11. Big brother brands report: which companies might access our personal data the most?. URL: https://clario.co/blog/which-company-uses-most-data/ (дата обращения: 25.07.2022).

12. Social Networking Privacy: How to be Safe, Secure and Social. URL: https://privacyrights.org/consumer-guides/social-networking-privacy-how-be-safe-secure-and-social/ (дата обращения: 04.08.2022).

13. Companies, not people, should bear the burden of protecting data. URL: https://www.brookings.edu/blog/techtank/2019/12/18/companies-not-people-should-bear-the-burden-of-protecting-data/ (дата обращения: 04.08.2022).

14. Employees are 85 % more likely today to leak files than they were pre-COVID. URL: https://www.securitymagazine.com/articles/94141-employees-are–85-more-likely-today-to-leak-files-than-they-were-pre-covid (дата обращения: 04.08.2022).

15. Tinkoff ID. URL: https://www.tinkoff.ru/help/business-solutions/tinkoff-id/customer/ (дата обращения: 04.08.2022).

16. Законопроект № 1176731-7. URL: https://sozd.duma.gov.ru/bill/1176731-7 (дата обращения: 27.08.2022).

17. *Lapienytė J.* Latest Anonymous leak contains Yandex, Gmail, and Mail.Ru logins // Foreign policy. 2022.

18. Yle Pohjois-Koreassa: Kurkista suljetun maan omaan tietoverkkoon. URL: https://yle.fi/uutiset/3-8882096/ (дата обращения: 04.08.2022).

УДК 004.891.2 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-18-22**

П. С. Бухвалов*
магистрант
А. В. Воронов*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ КОРРЕКТНОСТИ МЕДИЦИНСКИХ ДИСТОРСИОГРАММ

Рассмотрены существующие на момент исследования в области применения методов машинного обучения в медицине. На основании данных исследований был выбран ряд алгоритмов, подходящих для использования в рамках решения задачи проверки корректности и верификации медицинских дисторсиограмм, с помощью которых проводится анализ нелинейных искажений проходящего через биологические объекты электрического сигнала.
Ключевые слова: *машинное обучение, искусственный интеллект, медицинские данные, проверка корректности, дисторсиограмма.*

P. S. Bukhvalov*
Postgraduate Student
A. V. Voronov*
PhD Sc. Tech., Assistant Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF USING MACHINE LEARNING METHODS IN ASSESSING THE CORRECTNESS OF MEDICAL DISTORSIOGRAMS

This paper examines the currently existing research in the field of application of machine learning methods in medicine. Based on these studies, a number of algorithms were selected that are suitable for use in solving the problem of verifying the correctness and verification of medical distorsiograms, with the help of which the analysis of nonlinear distortions of the electrical signal passing through biological objects is carried out.
Keywords: *machine learning, artificial intelligence, medical data, correctness check, distorsiogram.*

Введение

Исследование свойств различных биологических объектов посредством воспроизведения на них разного рода электрических явлений является довольно мощным инструментом, часто применяемым в диагностических методиках в медицине. В основе одной группы методик лежит процесс анализа электрических потенциалов, формируемых биологическими объектами. В качестве примера можно привести электроэнцефалографию, электрокардиографию и электронистагмографию. Другие методики основаны на исследовании прохождения через исследуемый объект тока, как правило – переменного, синусоидальной формы, как, например, в электрореографии и биоимпедансометрии.

В настоящее время возникают новые способы исследований, позволяющие осуществлять более комплексный и многоуровневый анализ биологических объектов. Одним из таких способов является способ исследования биологических объектов на основе анализа нелинейных искажений проходящего электрического сигнала [1].

В случае работы с медицинскими данными необходимо проанализировать большие объемы информации, например, результатов исследований и тестов, на основании которых можно сделать медицинское заключение или поставить диагноз. При этом даже незначительные ошибки в ходе проведения исследований или при их анализе могут создать угрозу для жизни и здоровья пациента. Дополнительная возмож-

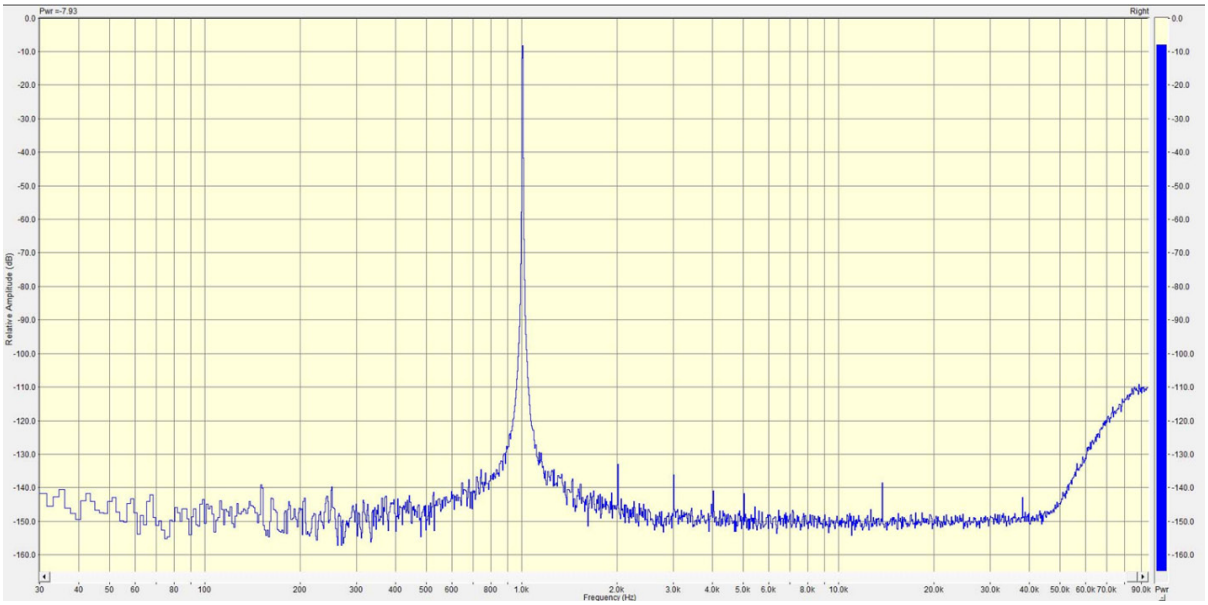


Рис. 1. Пример дисторсиограммы

ность верификация и проверки корректности полученных данных с помощью методов искусственного интеллекта позволит уменьшить вероятность принятия неверных решений на основе искаженных или неверных результатов исследований.

Анализ нелинейных искажений проходящего электрического сигнала

Анализ нелинейных искажений проходящего электрического сигнала заключается в пропускании через исследуемый образец с помощью электрического тока с помощью электродной системы с целью получения информации за счет анализа, получающегося в результате спектра и уровня гармонических искажений. Это позволяет получить информацию о свойствах исследуемого объекта, а именно – о способности вносить в исходный сигнал искажения, характеризующиеся спектром гармоник, и уровнем каждой из гармоник по отношению к опорному сигналу и к другим гармоникам. За счет этого формируется больший набор характеристик объекта, которые впоследствии могут быть подвергнуты инструментальному измерению. Кроме этого, полученные характеристики являются уникальными признаками конкретного образца биологического объекта. Эта совокупность измеряемых величин позволит объективизировать идентификацию биологического объекта [1].

Для реализации методики на практике необходимо сформировать электрический сигнал, пропустить его через биологический объект, в сигнале на выходе из объекта определить наличие гармонических искажений этого сигнала. Далее происходит измерение характеристик полученных искажений, таких как номера составляющих искажения сигнала гармоник, уровень гармоник, соотношение уровней гармоник между собой и с исходным сигналом.

Процесс проведения исследования состоит из следующих этапов:

– программный генератор, установленный на персональном компьютере, подает цифровой сигнал на цифро-аналоговый преобразователь;

– сигнал от цифро-аналогового преобразователя подается через соответствующий проводник на первый из электродов, прикладывается через электрод к биологическому объекту, снимается вторым электродом;

– сигнал подается через проводник на вход аналогово-цифрового преобразователя, далее в цифровой форме обрабатывается установленным на персональном компьютере программным обеспечением для анализа гармонических искажений.

Результаты исследования могут быть представлены в графической форме и сохранены в виде так называемой дисторсиограммы. Пример дисторсиограммы представлен на рис. 1.

Применение машинного обучения в медицине

На текущий момент в медицине, как и во многих других сферах деятельности, достаточ-

но широко применяется практика внедрения новых современных программных решений, способных к более гибкому анализу данных. Одним из наиболее популярных таких решений является использование методов машинного обучения.

Существующие на сегодняшний день методы машинного обучения подходят для решения широкого спектра задач, таких как классификация ряда объектов по определенным признакам или осуществления предсказания некоторого события на основе анализа ряда предыдущих событий. Данные методы искусственного интеллекта позволяют реализовывать гибкие системы анализа данных и при этом требуют небольших материально-технических затрат [2]–[4].

Используется машинное обучение, например, при возрастной диагностике, которая является ключевым элементом в идентификации личности при проведении судебно-медицинских экспертиз. На основе маркировки возрастных групп рекомендованной VII Всесоюзной научной конференцией по возрастной морфологии, физиологии и биохимии, было выделено семь возрастных групп: до 12 лет; от 13 до 18 лет; от 19 до 21 года; от 22 до 35 лет; от 36 до 60 лет; от 61 до 75 лет; старше 75 лет. С помощью указанных моделей осуществлялась классификация возрастной группы людей по заданным признакам. Рассматривались следующие алгоритмы: RF (Random Forest), CatBoost, KNN (K-Nearest Neighbors), LR (Logistic Regression), SGD (Stochastic Gradient Descent), SVM (Support Vector Machine), NB (Naïve Bayes), t-SNE (t-distributed Stochastic Neighbor Embedding) и UMAP (Uniform Manifold Approximation & Projection). В рамках представленного исследования для обучения и валидации различных классификаторов, использовались базы данных возрастных изменений костных и хрящевых тканей. Полученные результаты доказали перспективность методов машинного обучения, используемых в судебно-экспертной медицинской практике для определения возраста, поскольку методы показали достаточно высокую (около 90 %) точность конечного результата [5].

Уже сейчас некоторые модели активно применяются в различных сферах медицины, например, в диагностике раковых заболеваний. Для диагностики наличия у пациента рака головного мозга в [6] рассматривались такие методы классификации как RF, MP (Multilayer Perceptron), KNN, NB. По результатам, представленным в данной статье, наилучший результат показала модель NB, с величиной Accuracy равной 0.76 и F-measure равной 0.75.

Рассматривалась возможность использования метода RF в рамках платформы IonTorrent в процедуре NGS (Next-generation DNA sequencing), использующийся также при диагностике рака. Модель применялась для классификации соматических вариантов, обнаруженных с помощью NGS при опухолях легких, колоректальной области, меланоме и глиоме. Отмечается, что алгоритм RF удалось легко и быстро интегрировать в существующую информационную систему, для его выполнения не потребовалось увеличение вычислительных мощностей. Однако было указано, что при формирование большого числа деревьев решений классификация занимает больше времени [7].

Методы LR и SVM также были рассмотрены на предмет возможного использования их в задаче классификации диагноза рака молочной железы по 3 стадиям: Стадия I, Стадия II и Стадия III. Было установлено, что SVM имеют лучшую точность классификации с максимумом точности 98,11 %, LR показал 56,60 %. Для улучшения результата мультиклассовой классификации автор предложил объединить обе модели в гибридную SVM-LR модель. Отмечается, что по результатам проведенных тестов, гибридный SVM-LR очень перспективный в задаче мультиклассовой классификации. В [8] также рассматривалась возможность использования алгоритмов машинного обучения для раннего выявления и диагностики рака молочной железы. При проведении исследований были получены следующие результаты по метрике Accuracy: LR – 95,8 %, KNN – 95,1 %, SVM – 97,2 %, NB – 91,6 %, RF – 98,6 % [9].

Алгоритмы классификации используются для классификации белка по его структуре, что помогает в дальнейшем анализировать свойства последовательностей белка, находить между ними взаимодействия и прогнозировать функции белка. В рамках дынных исследований использовались методы RF, NB, а также SVM и KNN. Было установлено, что SVM среди рассмотренных алгоритмов дает лучший результат [10], [11].

Применение методов машинного обучения рассматривается и в области обнаружения и диагностики COVID-19, например, анализ спектрограммы кашля пациента. В качестве алгоритмов здесь использовался RF, а также GBM (Gradient Boosting Machine) и XGBoost. В качестве метрик использовались Precision, F-mesuare и Accuracy. После проведенных экспериментов все три модели в среднем дали примерно одинаковые результаты: Precision – 98,2 %, F-measure – 99 %, Accuracy – 89,6 % [12], [13].

В [14] и [15] рассмотрено применение интеллектуальных методов в области анализа и прогнозирования болезней сердца. В первой предлагаемые классификаторы SVM, KNN и NB сравниваются на основе следующих параметров: время тестирования, Precision, Recall, NPV и Accuracy. SVM показал точность 87,4 %, KNN 95,1 %, NB показал результат 96,9 % и при этом показал меньшее время, необходимое для принятия решений. По значению метрик Recall и Precision, KNN показал 90.5 по Recall и 90.5 по Precision. NB 93.0 и 93.06 по Recall и Precision. Наконец, SVM показал худший результат со значениями 70.0 и 70.92 по Recall и Precision.

Во второй сравниваются между собой модели KNN, LR, MP, RF, SVM. В качестве критериев оценки высчитывалась точность, а также производилось построение кривой ошибок ROC с последующим вычислением площади под ней – AUC ROC. В результате оценки алгоритм RF показал точность равную 83 %, AUC ROC равным 99 %, LR показал точность равную 88 % и AUC ROC равный 91 %, что является лучшим результатом среди всех представленных моделей. Авторы обеих статей отмечают, что благодаря основанным на представленных моделях экспертных медицинских системах принятия решений соотношение смертельных исходов при прогнозировании болезней сердца было снижено.

Анализ методов машинного обучения также проводился для задачи классификации сердечно сосудистых заболеваний. В рамках данной задачи рассматривались алгоритмы KNN, NB, деревья решений, а также искусственные нейронные сети. В ходе исследований была разработана новая автоматизированная стратегия прогнозирования сердечных заболеваний с помощью аритмических маркеров использовала в основе алгоритмы KNN, деревья решений, SVM, NB и RF. Система интеллектуального прогнозирования на основе NB была использована для своевременного прогноза факторов риска, связанных с заболеваниями сердца. Результаты показали эффективное прогнозирование факторов риска, потенциально приводящих к сердечным заболеваниям [16].

Разработка инструментов диагностики диабета также проводилась с использованием машинного обучения, что позволило выявлять болезнь на ранней стадии. В качестве возможных к применению методов рассматривались такие методы, как SVM, RF и LR. В качестве признаков для принятия решений выступали возраст, уровень сахара в крови натощак, уровень сахара в крови после еды, уровень глюкозы в плазме натощак, глюкоза в плазме, гликированный гемоглобин, тип и класс. По результатам анализа выяснилось, что алгоритм RF был наиболее точными в прогнозировании диабета [17].

Проводились активные исследование с алгоритмом SVM, например, в области прогнозирования состояния здоровья пациентов, чему соответствует большое число исследовательских работ [18]. Алгоритмы KNN и SVM применялись для анализа и классификации маленьких круглых синих клеточных опухолей на соответствующие им подклассы [19]. SVM использовался для анализа и прогнозирования того, как сердечные пациенты придерживаются режима приема лекарств. В результате миллионы людей смогли избежать неблагоприятных последствий, таких как повторная госпитализация или даже смерть. Для правильной диагностики диабета модель SVM является абсолютной необходимостью, а также очень эффективно применялся при оценке артериальной гипертензии и артериального давления [20].

Заключение

Таким образом, на основе проведенного анализа было установлено, что внедрение моделей машинного обучения в некоторое сферы медицины позволило повысить качество проводимых исследований и оказало существенную помощь в принятии в процессе обследований и лечения решений.

Именно поэтому перспектива внедрение моделей машинного обучения, решающих задачу классификации, в процесс исследований биологических объектов, на основе анализа нелинейных искажений проходящего электрического сигнала видеться перспективным способом в качестве упрощения процедуры анализа результатов исследований, а также в качестве поддержки при принятии решений в отношении этих результатов.

В результате исследования было установлено, что в качестве моделей машинного обучения для анализа медицинских дисторсиограмм следует рассмотреть модели KNN, RF, LR, SVM и NB, поскольку данные модели показали высокую эффективность в различных сферах медицины.

В качестве дальнейшего исследования необходимо осуществить экспериментальную оценку эффективности выполнения поставленной задачи каждым из выбранных алгоритмов машинного обучения, а также провести их сравнительный анализ.

Список источников

1. Патент: Способ исследования биологических объектов на основе анализа нелинейных искажений проходящего электрического сигнала / М. С. Коржук, В. А. Акулинин, М. В. Заболотных, В. М. Коржук. Омск, 2019. 12 с.

2. *Флах П.* Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. М.: ДМК Пресс, 2015. 400 с.

3. *Миронов А. М.* Машинное обучение: учеб. пособие. Ч. 1. М., 2018. 83 с.

4. Теория и практика машинного обучения: учеб. пособие / В. В. Воронина, А. В. Михеев, Н. Г. Ярушкина, К. В. Святов. Ульяновск: УлГТУ, 2017. 290 с.

5. Age Classification in Forensic Medicine Using Machine Learning Techniques / G. Zolotenkova, A. Rogachev, Y. Pigolkin et al. 2022. Vol. 14. N 1.

6. Multiclass Classification of Brain Cancer with Machine Learning Algorithms / B. Erkal, S. Basak, A. Ciloglu et al. Ankara, 2020.

7. Machine learning random forest for predicting oncosomatic variant NGS analysis / E. Pellegrino, C. Jacques, N. Beaufls et al. Scientifc Reports, 2021.

8. A Machine Learning-Based Rational Breast Cancer Diagnosis / K. Naqvi, D. Gautam, A. Srivastava et al. // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, July 2022. Vol. 9, Issue 7.

9. Vector Machine and Logistic Regression for Multiclass Classification: A Case Study on Wine Dataset / E. Atmanegara, T. Purwa // Indonesian Journal of Data Science. 2021. Vol. 1. N 1. P. 1–7.

10. Human Protein Sequence Classification using Machine Learning and Statistical Classification Techniques / C. Gupta, S. Tripathi, A. Bihari et al. // International Journal of Recent Technology and Engineering. 2019. Vol. 8 Issue 2.

11. Analysis of DNA Sequence Classification Using CNN and Hybrid Models / H. Gunasekaran, K. Ramalakshmi, A. Arokiaraj et al. // Hindawi Computational and Mathematical Methods in Medicine Volume. 2021. 12 p.

12. *Barcenas R., Fuentes-Garcia R.* Risk assessment in COVID-19 patients: A multiclass classification approach // Informatics in Medicine Unlocked. 2022. N 32.

13. *Catal H., Reis S. Kaya V.* Machine Learning Applications to Predict Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) // Conference: IOCENS'21: Turkey, 2019.

14. *Rahma M., Salman A.* Heart Disease Classification – Based on the Best Machine Learning Model // Iraqi Journal of Science. 2022. Vol. 63. N 9. P. 3966–3976.

15. *Yousefi S.* Comparison of the performance of machine learning algorithms in predicting heart disease // Frontiers in Health Informatics. 2021. Vol. 10.

16. *Panicker S., Gayathri P.* Use of Machine Learning Techniques in Healthcare: A Brief Review of Cardiovascular Disease Classification // International Conference on Communication and Information Processing (ICCIP-2020).

17. Classification of Diabetes Types using Machine Learning / O. Adigun, F. Okikiola, N. Yekini, R. Babatunde // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2022. Vol. 13. N 9.

18. *Payal M., Ananth T., Ajagbe S.* Support Vector Machines (SVMS) Based Advanced Healthcare System Using Machine Learning Techniques // International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. 2022. Vol. 10, Issue 5.

19. *Vinezha P., Zuherman R.* Application of machine learning on brain cancer multiclass classification // International Symposium on Current Progress in Mathematics and Sciences 2016.

20. *Payal M., Ananth T., Padmapriya N.* SVM based Classification of Recent Diseases using Machine Learning Algorithms // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2022. Vol. 11, Issue 5.

УДК 654.937 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-23-29**

В. П. Дашевский**
кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник
С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
А. В. Рысин*
старший преподаватель
Н. И. Гарматий*
магистрант
Д. А. Павлюков*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
***Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук*

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ И СТАНДАРТОВ СИСТЕМ РЕЧЕВОГО ОПОВЕЩЕНИЯ

Рассмотрены существующие решения системы оповещения и стандарты, по которым строятся системы, а также слабые места, возникающие при сборке существующих решений. В конце статьи предлагается решение, позволяющее улучшить уровень защиты здания или предприятия.
Ключевые слова: *облачная система голосового оповещения, система оповещения, сравнения систем оповещения.*

V. P. Dashevskiy**
PhD Sc. Tech., Associate Professor, Senior Researcher
S. V. Solyonyj*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. V. Rysin*
Senior Lecturer
N. I. Garmatiy*
Postgraduate Student
D. A. Pavlyukov*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
***St. Peterburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences*

OVERVIEW OF EXISTING TECHNOLOGIES AND STANDARDS FOR PUBLIC ADDRESS SYSTEMS

Considered the existing solutions of the warning system and the standards by which the systems are built, as well as the weaknesses that arise when assembling existing solutions. At the end of the article, a solution is proposed that will improve existing ones and increase level of protection of a building or facility.
Keywords: *Cloud voice announcement system, public address system, public address system comparisons.*

Системы речевого оповещения людей являются важным элементом инфраструктуры, которые существенно отличаются от других систем передачи информации, поэтому не могут быть ими заменены.

Традиционные системы распространения информации:

– Системы теле- и радиовещания, информационные табло и терминалы, Интернет. Они передают информацию из единого источника, не имеют пространственной избирательности, не могут гарантировать, что люди, которым предназначена информация, получат ее оперативно. Например, выключенный телевизор или радио на момент оповещения.

– Системы мобильной связи. Предоставляют информацию индивидуально каждому человеку, однако не могут гарантировать ее оперативное получение (наличие средств мобильной связи при себе). Отправитель информации не может оперативно получить список получателей информации, например, в общественном месте.

Таким образом, наличие распределенных систем оповещения с привязкой по зонам является единственным способом способным доставлять актуальную информацию до людей в месте их непосредственного нахождения.

В качестве примера такой системы можно рассмотреть сценарий террористической атаки внутри здания, в результате которой оказывается выведенным из строя диспетчерский пункт оповещения, заблокирован основной вход/выход в здание и возможны иные ограничения. В этой ситуации, очевидно, невозможно использовать заранее спроектированные схемы эвакуации людей. Оповещение должно быть адресным, учитывать реальную обстановку. Кроме того, координация такого оповещения потребует наличия резервного диспетчерского пункта.

Подобные сценарии становятся все более вероятными и требуют развития эффективных технических средств. К сожалению, многие существующие системы являются продуктом многолетней постепенной модернизации систем оповещения первых поколений, в результате чего как архитектура таких систем, так и компонентная база, являются устаревшими, и это отрицательно сказывается на эффективности.

Существует два основных источника требований для создания систем речевого оповещения:

– ГОСТ Р 42.3.01-2021. Гражданская оборона. Технические средства оповещения населения. Классификация. Общие технические требования.

– СП 3.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре.

Необходимо отметить, что для систем речевого оповещения технические средства ввода, передачи и воспроизведения речевой информации дают основной вклад в стоимость самой системы, поэтому производители стремятся реализовать максимум дополнительных возможностей и расширить сферу применения своих продуктов. Так, многие реальные системы имеют не только возможности для оповещения людей в целях гражданской обороны, но и оснащаются модулями сопряжения с системами пожарной сигнализации [1].

Существующие системы оповещения при эвакуации

В зависимости от функциональных характеристик, система оповещения и управления эвакуацией (СОУЭ) людей делятся на типы, приведенные в табл. 1 [3].

Таблица 1

Характеристики СОУЭ [8]

Характеристика СОУЭ	Наличие указанных характеристик у различных типов СОУЭ				
	1	2	3	4	5
1. Способы оповещения:					
звуковой (сирена, тонированный	+	+	*	*	*
сигнал и др.);	–	–	+	+	+
речевой (передача специальных	*	*	*	*	*
текстов);	*	+	+	+	+
световой:	–	*	*	+	*
а) световые мигающие оповещатели;	–	–	–	*	+
б) световые оповещатели «Выход»;					
в) эвакуационные знаки пожарной безопасности, указывающие направление движения;					
г) световые оповещатели, указывающие направление движения людей, с изменяющимся смысловым значением					
2. Разделение здания на зоны пожарного оповещения	–	–	*	+	+
3. Обратная связь зон пожарного оповещения с помещением пожарного поста-диспетчерской	–	–	*	+	+
4. Возможность реализации нескольких вариантов эвакуации из каждой зоны пожарного оповещения	–	–	–	*	+
5. Координированное управление из одного пожарного поста-диспетчерской всеми системами здания, связанными с обеспечением безопасности людей при пожаре	–	–	–	–	+

«+» – требуется, «*» – допускается, «–» – не требуется

В большинстве случаев используют системы 4 и 5 типа, которые будут рассмотрены далее.

Архитектура систем речевого оповещения

Рассмотрим архитектуру систем 4 и 5 типа. По существующим нормативам в них должна быть реализована связь зоны пожара с пунктом управления или диспетчерским постом. К системе обратной связи предъявляются такие требования, как надежность, обеспечение бесперебойного питания, контроль шлейфов. Система связи должна быть двусторонней, вандалозащищенной и функционировать в экстренных условиях, например, при повышенном шуме. Еще одним важным требованием СОУЭ 4 и 5 типов является возможность организации

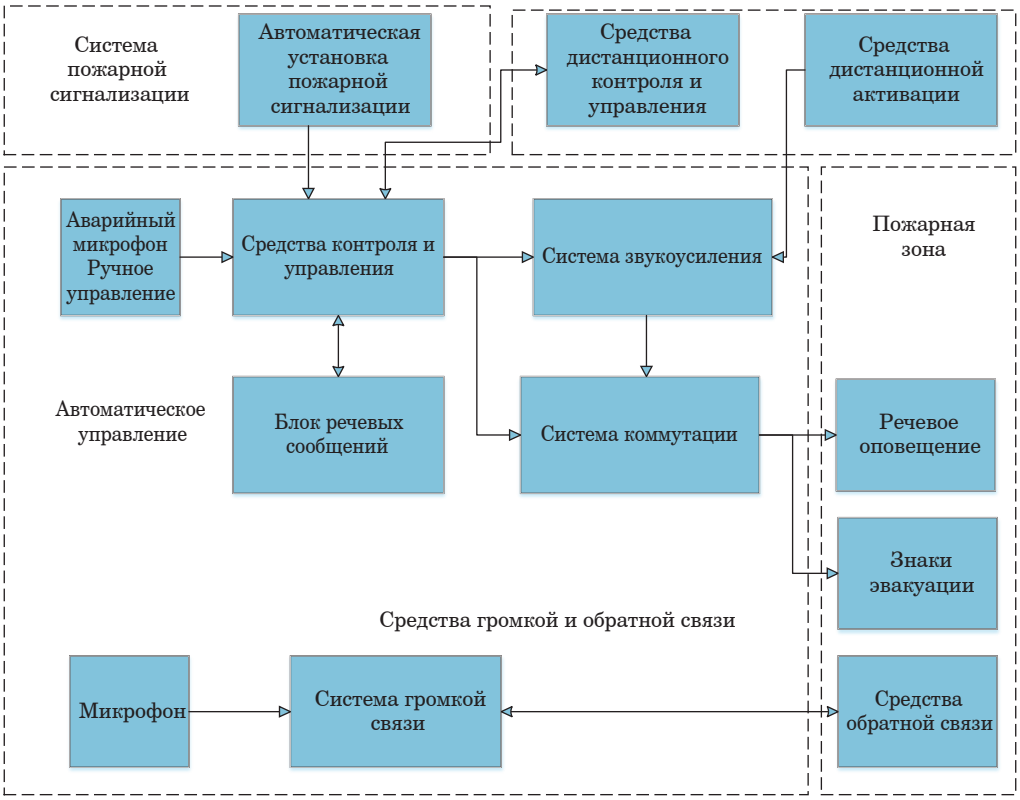


Рис. 1. Функциональная схема СОУЭ 4 типа

нескольких вариантов эвакуации из каждой зоны оповещения [2]. В этом случае СОУЭ должна осуществлять «сложный алгоритм оповещения». Задача сложного алгоритма – выполнить определенный сценарий – последовательность оповещения. Такие задачи на сегодняшний день эффективно решаются не только программными, но и аппаратными средствами. Пример архитектуры 4 типа представлен на рис. 1.

Для СОУЭ 5 – системы с возможностью координированного управления актуально понятие интеграции [4]. Под интеграцией следует понимать возможность эффективного совместного функционирования нескольких различных систем, решающих общую задачу, которая на сегодняшний день наиболее оптимально решается на базе цифровых технологий. Цифровые системы имеют известный ряд преимуществ: высокое качество звука, возможность передачи информации на большие расстояния, помехоустойчивость, защиту и возможность протоколирования информации [5].

Основные характеристики

Прежде чем описать, по каким основным характеристикам будет производится выбор аппаратуры, необходимо внести некоторые уточнение. В ГОСТ 53325-2009 описаны требования, которые предъявляются к динамикам для оповещения людей, а также к линиям связи [7]. В данном случае рассматриваются системы, которые будут подключаться по линии связи к динамикам. Также к динамикам и линиям передач предъявляются параметры, которые связны с конкретными условиями и предприятиями, поэтому в данной статье они затронуты не будут.

Основные характеристики системы оповещения представлены в табл. 1, из которой видно, что система должна иметь возможность речевого оповещения как заготовленного заранее, так и в прямом эфире. Важно знать, есть ли у нее возможность управлять указателями пожарных выходов и принимать данные с датчиков, отвечающих за определение пожара или задымленности, наличие управления различными зонами, возможность реализации нескольких вариантов эвакуации, управления всей системой из диспетчерской [4].

Для относительно корректного сравнения типовых решений различных производителей будем рассматривать систему с минимальным бюджетом, рассчитанным на 15 точек передач звукового сообщения и расчетом затрат на одну точку оповещения.

Системы известных производителей

Перед разработкой своей системы оповещения рассмотрим существующие системы оповещения, которые применяемые на текущий момент. Наиболее популярные типовые решения для локальных систем оповещения существуют на базах: ITC Escort; ROXTON-INKEL; Venas; Inter-M.

Типовые решения на базе ITC Escort

Весь комплексный ряд выполнен в корпусе для монтажа в стандартный электрический шкаф, широкий выбор блоков позволяет собрать любую систему. Для сборки системы понадобится универсальный усилитель ITC Escort T-60, микрофоны – например, T-621; для автоматического речевого оповещения необходим блок T-6203. Он подключается на вход усилителя и позволяет записывать и хранить одно речевое сообщение длительностью до 60 секунд. Универсальный усилитель позволяет установить до пяти источников аудиосигнала, поэтому для увеличения количества используем модуль T-6202, этот блок позволит увеличить количество аудиоканалов до пятнадцати.

Цена без учета расходных материалов на оповещение одной зоны составляет 10 тыс. руб., так же цена может измениться при увеличении количества зон, так как для их увеличения необходимо будет докупить модуль T-6202 и громкоговорители. Таким образом, дальнейшая модификация увеличения их количества будет стоить 5 тыс. руб. за зону.

Типовые решения на базе ROXTON-INKEL

Так же, как и ITC Escort, весь модельный ряд выполнен для монтажа в стандартный электрический шкаф. Данная компания предоставляет в одной системе также модули для пожарной безопасности. Для автоматического или ручного оповещения о пожаре используют модуль аварийного переключателя IES-9116 ROXTON, сигнал оповещения подается с аварийной панели IEP-9216 ROXTON; данный модуль может только воспроизводить сирену на 16 точек. Для того чтобы помимо сирены диктовались сообщения, необходим модуль VFM-60R. Данный блок может проверять целостность линии и работоспособность динамика, а также отправлять заготовленные или передаваемые в реальном времени сообщения максимально на 16 точек оповещения. С модулем IEP-9216 в комплекте идет микрофон, также есть возможность подключения еще одного микрофона. Для подключения удаленных точек системы используется усилитель мощности IPA-9312.

Систему можно оснастить дополнительным независимым питанием, что обеспечит ее работу при его отключении. Можно выделить, что в данное типовое решение входит система пожарной безопасности, для работы которой необходимо дополнительное подключение датчиков обнаружения пожара, обеспечивающих возможность автоматического оповещения при его возникновении.

Цена без учета расходных материалов на оповещение одной зоны составляет 17 тыс. руб., таким образом, она может измениться при увеличении количества зон, так как для их увеличения необходимо будет докупить модуль IPS-9116I и громкоговорители. Дальнейшая модификация увеличения их количества будет стоить 4,5 тыс. руб. за зону.

Типовые решения на базе Venas

Монтаж всего модельного ряда оборудования данной компании выполняется в стандартный электрический шкаф. Для минимального комплекта необходим модуль усилителя мощности VM-2240 ER, в комплекте микрофона нет, для этого добавим модуль микрофона RM-200M, так как у него есть ряд дополнительных функций (переключение на определенную зону и подключение неограниченного числа микрофонов по локальной сети). Для проигрывания аудиодорожек к модулю VM-2240 ER необходимо подключить любой CD или кассетный проигрыватель посредствам RCA-разъема.

Преимуществами данного набора являются относительно небольшие габариты и его универсальность, однако у него отсутствуют модули автоматического оповещения при чрезвычайных ситуациях.

Цена без учета расходных материалов на оповещение одной зоны составляет 11 тыс. руб., также она может измениться при увеличении количества зон, так как для их увеличения необходимо будет докупить модуль VM-2240 ER и громкоговорители. Таким образом, дальнейшая модификация увеличения количества зон будет стоить 8,6 тыс. руб. за зону.

Типовые решения на базе Inter-M

Система оповещения и управления эвакуацией людей (СОУЭ) 5 типа реализована на базе блока автоматического оповещения SC-05EM и трансляционного усилителя PAM-520. Она позволяет проигрывать 8 различных сценариев эвакуаций, охватывая до пяти зон оповещения, на каждой из которых раздельно регулируется

Таблица 2

Сводная таблица характеристик

Характеристика	ITC Escort	ROXTON-INKEL	Venas	Inter-M
Способ оповещения: – звуковой; – речевой; – световой	 + + -	 + + -	 + + +	 + + +
Разделение зданий на зоны	+	+	-	+
Резервный источник питания	-	+	+	+
Стоимость оборудования на 15 точек	151633 руб.	253506 руб.	249269 руб.	350134 руб.
Стоимость дальнейшей увеличения количества точек	5000 руб.	4500 Руб.	8600 руб.	7300 Руб.

громкость. Для передачи речевых сообщений можно подключить не более двух микрофонных консолей RM-05. Для музыкальной трансляции звуковых программ в фоновом режиме в целях экономии используем стационарный компьютер или ноутбук. На блоках автоматического питания PD-6359 и зарядного устройства PB-6207, использующих протокол связи RS-485, реализована система питания 220 В с подключением внешних аккумуляторов на 24 В. Для трансляции сообщений используем потолочные громкоговорители CS-03A. Данная система помещается в аппаратный шкаф, например PR-231A. Цена без учета расходных материалов на оповещение одной зоны составляет 21,5 тыс. руб. Расширение системы за одну зону составляет 7,3 тыс. руб.

Сравнение систем

В ходе рассмотрения всех типовых систем можно выделить, что в некоторые наборы не входит система пожаротушения, в связи с чем для них нужно будет собирать ее отдельно.

Для сравнения рассмотренных типовых решений сведем их основные характеристики в табл. 2.

Альтернативное решение существующих платформ

В качестве альтернативы предлагается уйти от существующих решений центральной системы вещания и отказаться от громоздких шкафов, а также протягивания отдельной сети оповещения. На рис. 2 представлен внешний вид платформы для облачной системы голосового оповещения. Это уже полностью готовое оборудование, которое необходимо подключить к Интернету и настроить его привязку к серверу. В данном устройстве также предусмотрены пины для подключения датчиков, которыми можно будет управлять и использовать для сбора данных об окружающей среде, пожара, возгорания и т. д. Такое решение хорошо тем что нету единой точки сбора и передачи сообщений при ЧП и для вывода из строя устройства необходимо отключение здания от Интернета, что представляет собой более сложный, а в некоторых ситуациях невозможный сценарий.

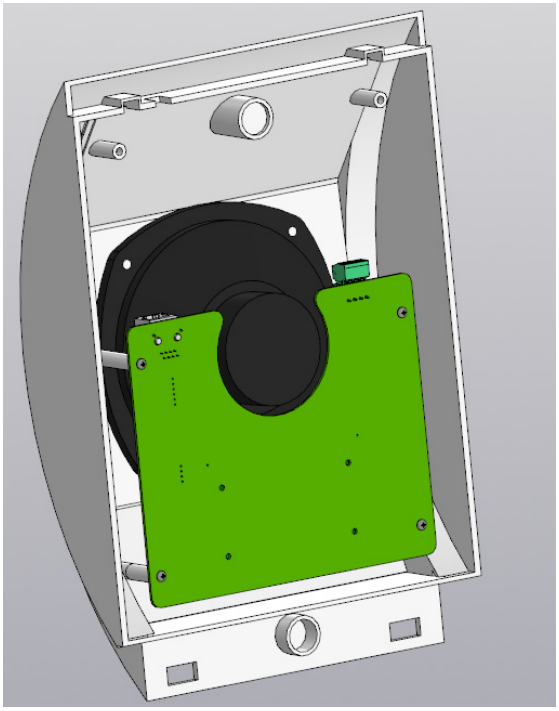


Рис. 2. Платформа облачной системы голосового оповещения

На рис. 3 показана структурная схема облачной системы голосового оповещения. В этом устройстве предусмотрено подключение питания по одному из двух источников. Первое возможное подключение – это передача питания по Интернет-кабелю. Таким образом, не нужно проводить отдельное питание 12 В для подключения системы голосового оповещения. По проводу Интернет будет передаваться напряжение 48 В, которое с помощью PoE (*power-over-Ethernet*) снижаем до 12 В. Второй возможностью являются 12 В клеммы, к котором необхо-

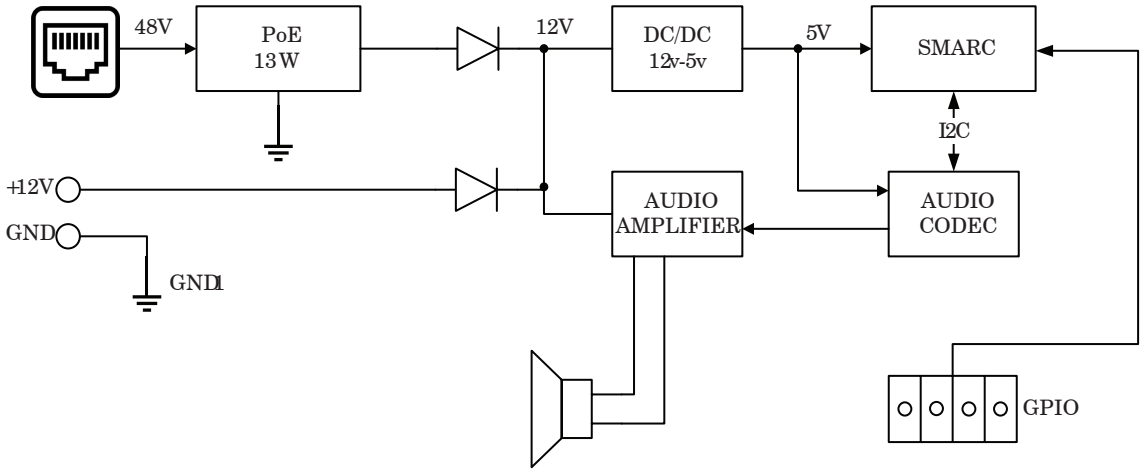


Рис. 3. Структурная схема облачной системы голосового оповещения

димо подвести напряжение 12 В. Для модуля «SMARC» и аудиокодека необходимо для питания 5В, поэтому в схему добавляем DC/DC преобразователь с 12 до 5 В. В качестве dc/dc преобразователя будет использоваться LMZ12003. Для расшифровки сигнала, поступающего с модуля смарк, необходим аудиокодек. На сегодняшний день отдается предпочтение кодеку ALC268 компании реалтек. И для усиления выходного сигнала необходим аудиоусилитель PAM8406 компании «DIODES». Системой голосового оповещения будет управлять модуль SMARC-AM335x-2. Модуль представляет собой законченную ЭВМ, построенную на основе процессора AM335x фирмы Texas Instuments с ядром ARM Cortex-A8.

В табл. 3 показана примерная цена, в которую не входит развязка для компонентов, а также цена за изготовление печатной платы.

Таблица 3

Примерная цена облачной системы голосового оповещения

Компонент	Цена
Корпус от настенного громкоговорителя WP-06T	2078 руб.
SMARC-AM335x-2	3500 руб.
DC/DC-преобразователь LMZ12003	730 руб.
Аудиоусилитель PAM8406	270 руб.
Всего:	6578 руб.

Заключение

Для корректного выбора системы нужно найти баланс между ее стоимостью и функционалом. Необходимо понимать, для каких целей она будет предназначена, и предусмотреть все возможные ситуации ее использования. Поэтому в ходе рассмотрения типовых решений различных производителей можно выделить, что большинство систем изготавливают 4 и 5 типа, так как они наиболее многофункциональны и отражают потребность в оповещении не только в стандартном режиме, но и в ходе различных ситуаций, в том числе чрезвычайных. Приблизительное рассмотрение систем дает лишь поверхностную оценку взаимосвязи функционала со стоимостью. Так, создание отдельной системы пожаротушения в некоторых случаях может обойтись дороже, чем выбор типового решения со встроенной системой пожарной безопасности и приобретением необходимых дополнительных датчиков.

Следует понимать, что все системы очень централизованы, при неблагоприятной ситуации, например, при отсутствии доступа к рубке эвакуация людей будет невозможна. Поэтому на текущий момент идут разработки облачной системы оповещения, которая позволит передать необходимые сообщения вне зависимости от возможности попасть в рубку. Также с 1 января 2021 года в силу вступил новый приказ МЧС России «Об утверждении Положения о системах оповещения населения», в котором также есть пункты про подключение локальной системы оповещения к региональной сети, одним из способов подключения является Интернет-подключение. (В статье приведены цены на 2021 г.)

Список источников

1. Система оповещения о чрезвычайные ситуации. URL: https://www.escortpro.ru/page/article/article137_sistemy_opoveshcheniya_o_

chrezvychaynykh_situatsiyakh_2021.htm (дата обращения: 18.12.2021).

2. Системы оповещения и их особенности. URL: http://secuteck.ru/articles2/sis_sv/sist_opovesh_i_ih_osobenn (дата обращения: 19.12.2021).

3. Системы оповещения вчера и сегодня. URL: https://www.escortpro.ru/page/article/article127_pa_system_yesterday_today.htm (дата обращения: 19.12.2021).

4. Оповещение населения. Системы оповещения населения. URL: https://06.mchs.gov.ru/deyatelnost/grazhdanskaya-oborona/opoveshchenie-naseleniya/opoveshchenie-naseleniya-sistemy-opoveshcheniya-naseleniya (дата обращения: 19.12.2021).

5. Назначение и основные задачи систем оповещения населения. URL: https://sudact.ru/law/prikaz-mchs-rossii-n-578-minkomsviazi-rossii/polozhenie-o-sistemakh-opoveshcheniia-naseleniia/ii/ (дата обращения: 19.12.2021).

6. СНиП 2.08.02-89. Пособие к проектированию СОУЭ в общественных зданиях. Актуализация от 21.05.2015 – СНиП 2.08.02-89 «Общественные здания и сооружения».

7. ГОСТ Р 53575-2009 (МЭК 60268-5:2003). Громкоговорители. Методы электроакустических испытаний (М.: Стандартинформ, 2011).

8. СП 3.13130.2009. Система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре.

УДК 004.056, 519.812 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-30-32**

Т. Н. Елина*
кандидат экономических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РАНЖИРОВАНИЕ ПРОЕКТОВ ПО ФОРМИРОВАНИЮ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ПРЕДПРИЯТИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ПОЛЕЗНОСТИ

Рассмотрен подход к проектированию системы принятия решений по выбору альтернативных проектов в области корпоративной защиты информации на основе построения функции полезности исходов и сравнительной оценки ее значений. Данный подход позволяет осуществлять однозначный выбор как по количественным, так и по качественным критериям на основе предпочтений лица принимающего решения.
Ключевые слова: *система принятия решений, теория полезности, комплексные системы защиты информации.*

T. N. Yelina*
PhD Sc. Economic, Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

RANKING PROJECTS FOR THE FORMATION OF AN INTEGRATED INFORMATION SECURITY SYSTEM AT AN ENTERPRISE USING UTILITY THEORY

An approach to designing a decision-making system for choosing alternative projects in the field of corporate information security based on the construction of the utility function of outcomes and a comparative assessment of its values is considered. This approach makes it possible to make an unambiguous choice both in terms of quantitative and qualitative criteria based on the preferences of the decision maker.
Keywords: *decision-making system, utility theory, complex information security systems.*

Разработка и внедрение на предприятии комплексной системы защиты информации (КСЗИ) можно рассматривать как инвестиционный проект, требующий определенных финансовых затрат и имеющий своей целью некоторые финансовые результаты. Если с определением способа расчета инвестиционных затрат на такой проект сложностей не возникает – они могут быть рассчитаны либо как сумма стоимостей внедрения отдельных средств защиты в случае их поэтапной реализации, либо как комплексный проект с выделенными задачами, ресурсами и назначениями [1], то вопрос с расчетом результатов от внедрения КСЗИ часто вызывает определенные трудности. Это связано в первую очередь с невозможностью выразить все результаты от использования средств защиты информации в денежной форме, как правило, достаточно большая часть показателей является качественными и оценивается нечетко [2]. Очевидно, что основным направлением достижения экономического эффекта от внедрения средств информационной безопасности на предприятии является снижение ущерба от утечек информации вследствие реализации угроз информационной безопасности. Средняя стоимость утечки включает затраты компании, начиная от юридических, нормативных и технических мер реагирования в случае кибератаки до потери репутации бренда, клиентов и продуктивности сотрудников. Согласно отчету экспертно-аналитического центра ИнфоВотч в 2019–2021 годах средняя стоимость одной утечки в мире составила 4 млн долл. [3].

При оценке возможного ущерба (риска) от утечек важным показателем является вероятность успешной реализации атаки [4]:

$$R = P(t) \times S,$$

где R – значение риска; $P(t)$ – вероятность реализации угрозы информационной безопасности (применяется смесь качественной и количественной шкалы); S – степень влияния угрозы

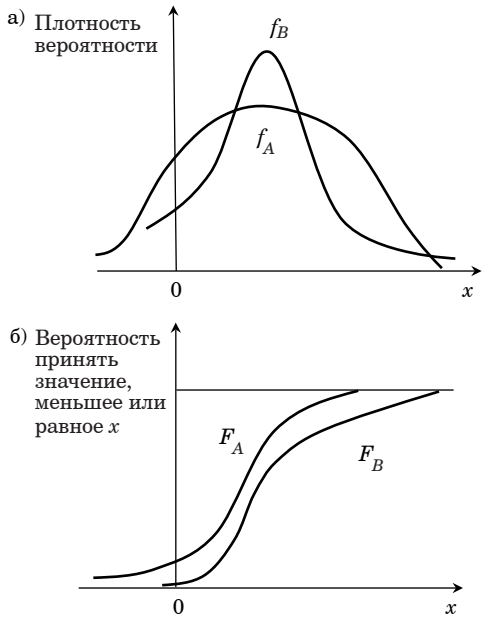


Рис. 1. Пример доминирования альтернативных проектов по вероятности: а – функции плотности распределения последствий (результатов) от внедрения альтернативных проектов; б – функции распределения вероятностей альтернатив

на информационный актив (цена актива в качественной и количественной шкале).

Таким образом, для каждого информационного актива может быть рассчитана степень риска его информационной безопасности, которая может изменяться от 0 до 8. Согласно стандарту [5] низкий риск оценивается от 0 до 2, средний – от 3 до 5, высокий – от 6 до 8. Оценка степени возможности реализации угрозы информационной безопасности на информационный актив производится по следующей шкале: нереализуемая угроза – 0 %, средняя – от 21 до 50 %, высокая – от 51 до 80 % и очень высокая – от 81 до 100 %. Степень тяжести последствий для разных информационных активов считается низким, если составляет до 0,5 % от величины капитала предприятия, высоким – от 1,5 до 3 % от величины капитала предприятия [6]. Идентификация угроз информационной безопасности, оценка вероятности их реализации и уровня ущерба производится в соответствии с методикой [7].

При внедрении КСЗИ перед инвестором (лицом, принимающим решения) стоит проблема выбора различных средств защиты, а также принятия решения о целесообразности применения этих средств. Для детерминированной системы выбор очевидно осуществляется сравнением размера затрат на КСЗИ и суммы предотвращаемого при этом ущерба. Но наличие вероятности реализации угрозы усложняет выбор. Предположим, имеются два альтернативных проекта КСЗИ A и B, плотности распределения последствий (результатов) соответственно f_A и f_B (рис. 1*а*) и функции распределения вероятностей F_A и F_B (рис. 1*б*) показаны на критерии оценки результатов, то есть на предотвращаемом ущербе от реализации угроз информационной безопасности X. Из рис. 1*б* видно, что вероятность того, что исход будет не более x , у альтернативы A больше, чем у альтернативы B, следовательно, в данном случае проект B предпочтительнее, чем A, и альтернатива B доминирует по вероятности над альтернативой A. Однако данный вывод не является очевидным при рассмотрении плотности распределения на рис. 1*а*. Случай, рассмотренный на рис. 1 является маловероятным. Чаще всего функции F_A и F_B пересекаются, и выбор бывает не так прост. В этом случае эффективным может являться расчет ожидаемого значения и дисперсии возможных результатов по критерию X. В табл. 1 представлен пример рассчитанных значений рассматриваемых показателей для разных альтернатив проектов КСЗИ.

Таблица 1

Пример расчета показателей рисков проектов КСЗИ (долл.)

Проект	Эффект		Ущерб		Математическое ожидание	Дисперсия
	Размер	Вероятность	Размер	Вероятность		
A	100 000	1	–	–	100 000	0
B	200 000	0,5	–	–	100 000	11 111 111 111
C	1 000 000	0,1	–	–	100 000	100 000 000 000
D	200 000	0,9	800 000	0,1	100 000	100 000 000 000

Для каждой альтернативы в табл. 1 математическое ожидание равно 100 тыс. долл. Однако для лица принимающего решения такие альтернативы не являются взаимозаменяемыми. Поэтому в модель системы поддержки принятия решений по выбору проекта следует добавить меру неопределенности, такую как дисперсия возможных результатов, что позволит упорядочить альтернативы по предпочтительности. Но и в этом случае не всегда можно говорить об однозначности выбора (альтернативы C и D в табл. 1). Для ранжирования проектов целесообразно использовать отношение предпочтения, которое не является абсолютным, а во многом зависит от точки зрения лица, при-

Таблица 2

Ранжирование альтернативных проектов КСЗИ на основании расчета функции полезности их исходов

Проект	$< x_i^*, \pi, x_i^\circ >, I=\{A,B,C,D\}$	$< x^*, \pi, x^\circ >$	$u(x)$	Ранг/приоритет
A	<100 000, 1, 0>	<1 000 000, 1, -800 000>	1	1
B	<200 000, 0,5, 0>	<1 000 000, 0,6, -800 000>	0,6	2
C	<1 000 000, 0,1, 0>	<1 000 000, 0,3, -800 000>	0,3	4
D	<200 000, 0,9, -800 000>	<1 000 000, 0,2, -800 000>	0,2	3

нимающего решение. Для этого рассмотрим результаты реализации проектов *A-D* как множество случайных исходов $X=\{x_A, x_B, x_C, x_D\}$ и установим наиболее и наименее предпочтительные исходы x° и x^*. Определим функцию полезности [8] как $u(x)$, тогда $u(x^\circ)=0$ и $u(x^*)=1$, а для остальных исходов подберем вероятность π такую, чтобы x описывался кортежем $< x^*, \pi, x^\circ >$, дающей π шансов за исход x^* и $(1-\pi)$ шансов за исход x°, тогда $u(x)=\pi\, u(x^*) + (1-\pi)\, u(x^\circ)=\pi$. Расчет полезности всех исходов X проектов *A-D* приведен в табл. 2.

В примере из табл. 2 наиболее приоритетным является проект A, наименее – D. Метод прямого установления полезности исходов альтернативных проектов может быть применен к принятию решений по выбору из небольшого количества альтернатив, так как предполагает субъективную оценку проектов лицом, принимающим решения. Как правило, такая задача и стоит при выборе средств защиты информации на предприятии для формирования КСЗИ. Использование данного метода позволит упростить принятие решения путем ранжирования альтернатив как по количественным, так и по качественным критериям, поскольку для ранжирования используется обобщенный показатель полезности результатов проектов.

Список источников

1. *Елина Т. Н., Мыльников В. А.* Методика оценки экономической эффективности внедрения комплексной системы защиты информации на предприятии // Завалишинские чтения '22: Сб. докладов XVII Межд. конф. по электромеханике и робототехнике. СПб.: ГУАП, 2022. С. 42–46.

2. *Елина Т. Н., Абалдова С. Ю.* Нейро-нечеткое моделирование процессов оценки результативности системы менеджмента качества // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. 2014. № 2 (20). С. 111–118.

3. Дайджест «Оценка ущерба от утечек для пострадавших компаний за период 2019–2021 гг. (по материалам IBM и Ponemon Institute)» // Экспертно-аналитический центр ИнфоВотч. М., 2021. URL: https://www.infowatch.ru/analytics/daydzhesty-i-obzory/srednyaya-stoimost-uscherba-ot-utechek-dannykh (дата обращения: 04.01.2023).

4. Risk management guide for information technology systems. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology: NIST 800-30. Введ. 06.01.2002. США, 2002. 56 с.

5. Спецификация системы управления информационной безопасностью: BS 7799-2:2005. Введ. 01.07.2005. Англия. 2005. 86 с.

6. Обеспечение информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации. Методика оценки рисков нарушения информационной безопасности: РС БР ИББС-2.2-200. Введ. 06.01.2009. М.: Стандартинформ, 2009. 23 с.

7. Методический документ ФСТЭК России «Методика определения угроз безопасности информации в информационных системах», утвержден Указом Президента РФ от 16.08.2004 №1085. URL: https://fstec.ru/component/ %20attachments/download/812 (дата обращения: 04.01.2023).

8. *Кини Р., Райфа Х.* Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Пер. с англ.; под ред. И. Ф. Шахнова. М.: Радио и связь, 1981. С. 138.

УДК 004.056.2 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-33-36**

И. В. Елтышева*
старший преподаватель
М. С. Романова*
ассистент
Б. К. Елтышев**
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
***Санкт-Петербургский государственный морской технический университет*

ЭВОЛЮЦИЯ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассматривается эволюция критериев, используемых для оценки информационной безопасности киберфизических систем, формируется представление о дуализме информационной и функциональной безопасности.
Ключевые слова: *киберфизические системы, функциональная безопасность, информационная безопасность.*

I. V. Eltyisheva*
Senior Lecturer
M. S. Romanova*
Assistant
B. C. Eltyishev**
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
***St. Petersburg State Marine Technical University*

EVOLUTION OF CRITERIA FOR ASSESSING THE INFORMATION SECURITY OF CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

The article examines the evolution of the criteria used to assess the information security of cyber-physical systems, the idea of the dualism of information and functional security is formed.
Keywords: *cyber-physical systems, functional security, information security.*

Четвертая промышленная революция («Индустрия 4.0»), начало которой провозгласил президент Всемирного экономического форума в Давосе Клаус Шваб между 2011 и 2016 годами, оказывает стремительно возрастающее влияние не только на производственную сферу, но и на многие другие аспекты нашей жизни. Ее основа – массовое использование информационных технологий (IT), впечатляющие масштабы автоматизации бизнес-процессов, развитие технологий искусственного интеллекта.

Центральной для «Индустрии 4.0» является идея киберфизических систем (КФС), которую ГОСТ ИСО/МЭК 62443 [1] определяет как совокупность «интеллектуальных машин, систем хранения и производственных мощностей, способных автономно обмениваться информацией, инициировать действия и независимо контролировать друг друга».

Объекты нашей деятельности – космические и летательные аппараты, корабли, суда, наземная и береговая инфраструктура – полностью соответствуют этому определению, то есть их следует рассматривать как киберфизические системы.

В их состав входят разнообразные взаимодействующие подсистемы, весьма специфичные для перечисленных отраслей, обладающие высоким уровнем сложности и функционирующие в нетривиальных условиях окружающей среды.

Каждая из этих подсистем имеет четко сформулированную цель (objective), которая может относиться к разным аспектам, применяться на разных уровнях, быть выражена разными способами, быть стратегической, тактической или оперативной, но в любом случае означает конкретный результат, который должен быть до-

стигнут. Именно такая трактовка зафиксирована в последней редакции ГОСТ Р ИСО 9000-2015 (Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь) [4].

Процитируем главный принцип, сформулированный в этом документе:

«Все понятия, принципы и их взаимосвязи должны рассматриваться в целом, а не в отрыве друг от друга. Ни одно понятие или принцип не является более важным, чем другие. В любое время важно достижение правильного баланса при их применении».

Понятие киберфизических систем включает области сетевого взаимодействия и безопасности. И вот здесь обнаруживаются серьезные несоответствия в подходах разных специалистов к пониманию и преодолению имеющихся проблем. Это несоответствие возникло исторически и практически не проявлялось до появления концепции киберфизических систем. В последние годы за рубежом и в нашей стране появились публикации, посвященные анализу проблемы и путей ее преодоления, например, Том Мини «Функциональная безопасность и «ИНДУСТРИЯ 4.0» [2], Майкл Бингаман «Коллаборация ИТ (информационные технологии) и ОТ (операционные технологии) как драйвер цифровизации» [3].

Вот как оценивает ситуацию ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 19791-2008 «Информационная технология. Оценка безопасности автоматизированных систем» [6].

В стандартах серии ИСО/МЭК 15408, целью которых является оценка продуктов информационных технологий, термин «система» используется для учета только аспектов информационных технологий конкретной системы. Определение термина «автоматизированная система», используемого в этом стандарте, включает в себя совокупность персонала, процедур и процессов, интегрированных с функциями и механизмами информационных технологий, применяемых совместно, чтобы установить приемлемый уровень остаточного риска в установленной среде функционирования автоматизированной системы.

Таким образом, уже здесь косвенно признается необходимость рассмотреть и включить в оценку общего риска недостижения цели АС аспекты, связанные с управляемым объектом, персоналом и средой его функционирования, методами, традиционными для IT-технологий.

В то же время существует огромная область систем промышленной автоматики и контроля» (IACS), в которой накоплен богатый, закрепленный многочисленными отечественными и зарубежными стандартами, опыт оценки и снижения рисков при проектировании и эксплуатации таких систем.

Обратимся к одному из таких стандартов ГОСТ Р 56205-2014 (он же IEC/TS 62443-1-1:2009) «Сети промышленной коммуникации. Безопасность сетей и систем» [7], где дается следующее определение IACS:

«Группа персонала, а также совокупность аппаратного и программного обеспечений, которые могут регулировать или воздействовать иным образом на безопасное, защищенное и надежное функционирование производственного процесса».

Понятие IACS охватывает системы управления, используемые на производственно-технологических предприятиях и установках, и другие отрасли, и задачи промышленности, такие как транспортные сети, в которых задействованы автоматизированные или дистанционно управляемые, или отслеживаемые объекты имущества.

Видим, что предшественниками рассматриваемого нами класса киберфизических систем были, с одной стороны, автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) в трактовке только что введенного (с 1 января 2023 г.) ГОСТ Р 59853-2021. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения [8]; с другой – системы промышленной автоматики и контроля в трактовке ГОСТ Р 56205-2014. Основополагающим «вертикальным» стандартом верхнего уровня для них является МЭК 61508 «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью» [9].

Здесь уже в явном виде формулируется дуализм информационной и функциональной безопасности:

– *функциональная безопасность* (*functional safety*). Часть общей безопасности, обусловленная применением УО и системы управления УО и зависящая от правильности функционирования Э/Э/ПЭ систем, связанных с безопасностью, а также других средств по снижению риска;

– *информационная безопасность* (*ИБ*) (*information security*). Сохранение конфиденциальности, целостности и доступности информации. Этот термин может включать в себя и другие дополнительные свойства, такие как подлинность, подотчетность, неотказуемость и достоверность. (Определение ИБ из ГОСТ Р ИСО/МЭК 27000-2021 [10].)

Рис. 1. Концепция гармонизированных требований к функциональной и информационной безопасности

Дальнейшее осмысление этого дуализма привело к тому, что и более общие термины его отразили.

– *Информационная технология* (*ИТ*). Приемы, способы и методы применения средств вычислительной техники при выполнении функций сбора, хранения, обработки, передачи и использования данных. (Из ГОСТ Р 59853-2021 (ИТ). КСАС. АС Термины и определения [8].)

– *Операционная технология* (*ОТ*). Это аппаратное и программное обеспечение, которое обнаруживает или вызывает изменения посредством прямого мониторинга и/или управления промышленным оборудованием, активами, процессами и событиями [11]. Термин утвердился для демонстрации технологических и функциональных различий между традиционными системами информационных технологий (ИТ) и промышленными системами управления окружающей средой.

Специфика реализации информационной безопасности киберфизических систем обусловлена тем, что такие системы имеют дело с объектами и процессами реального мира, при этом одна из главных задач – защита людей и окружающей среды от техногенных рисков. Нарушения ИБ таких систем могут приводить к катастрофическим последствиям для людей, среды и материальных активов и в этом их основные риски.

Принимаемые меры по обеспечению безопасности киберфизических систем должны гарантировать скоординированное снижение рисков ниже заданных уровней как для информационной, так и для функциональной составляющей безопасности, причем целесообразно это

Таблица 1

Менеджмент процессов	Management of Processes
Уровень целостности безопасности	Safety Integrity Level (SIL)
Менеджмент функциональной безопасности	Functional Safety Management
Менеджмент информационной безопасности	Security Management
Уровень безопасности	Security Level (SL)
Жизненный цикл интегрированной системы безопасности	Safety & Security Life Cycle
Оценка функциональной безопасности	Functional Safety Assessment
Преодоление случайных отказов	Random Failures Avoidance
Оценка информационной безопасности	Security Assesment
Преодоление систематических отказов и отказов ПО	System and Software Failures Avoidance
Преодоление атак	Attacks Avoidance
Контрмеры	Countermeasures

делать в рамках единого жизненного цикла (*Safety & Security Life Cycle*).

В [12] подробно рассматривается проблема совмещения требований к информационной безопасности (ИБ) с требованиями к функциональной безопасности (ФБ) и представлена диаграмма, которая может быть основой для координации деятельности по обеспечению ИБ и ФБ (рис. 1).

Соответствие исходных англоязычных и принятых в России терминов приведено в табл. 1.

Приведем некоторые комментарии к используемым терминам.

Security Level (SL)

Концепция уровней безопасности была создана для того, чтобы привязать понятие безопасности к зонам, а не отдельным устройствам или системам. Среди технических мер по защите КФС наиболее эффективным является размещение оборудования и ПО в зонах с различным уровнем ИБ. SL может применяться для определения стратегии полноценной многоуровневой эшелонированной защиты зоны [1].

Safety Integrity Level (SIL)

МЭК 61508 [9] под функциональной безопасностью (*functional safety*) подразумевает корректное функционирование, как системы управления, так и управляемого ею оборудования, а уровень целостности безопасности SIL – вероятность того, что система будет корректно выполнять функции безопасности при всех заданных условиях в течение заданного интервала времени.

Можно выделить частично пересекающиеся: области ФБ и ИБ:

– общие риски, связанные с отказами аппаратных средств, которые, как правило, носят случайный характер. Способы борьбы с такими отказами известны – это резервирование, диагностика, защита от экстремальных воздействий и т. п. Для них в ИБ и ФБ можно применять одни и те же контрмеры;

– систематические отказы, которые являются следствием ошибок общего проектирования и программирования ПО. Создаваемые ими уязвимости могут быть использованы злоумышленниками;

– ряд контрмер может быть общим для обеспечения как ИБ, так и ФБ (например, контроль доступа к оборудованию и информации);

– процессы разработки, верификации и валидации, направленные на обеспечение как ФБ, так и ИБ, могут быть реализованы в рамках единого жизненного цикла (*Safety & Security Life Cycle*).

Все это подчеркивает необходимость тесной координации между специалистами IT и OT на всех этапах жизненного цикла киберфизических систем.

Список источников

1. ГОСТ Р МЭК 62443-1-1-2016. Защищенность (кибербезопасность) сети и системы. Ч. 1-1. Терминология, концептуальные положения и модели.

2. *Мини Т.* / Пер. М. Русских. Функциональная безопасность и «ИНДУСТРИЯ 4.0». Ч. 1. Control Engineering Россия, #1 (91), 2021.

3. *Бингаман М.* / Пер. В. Рентюк. Коллаборация ИТ и ОТ как драйвер цифровизации. Control Engineering Россия, #1 (91), 2021.

4. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.

5. *Мини Т.* / Пер. М. Русских. Функциональная безопасность и «ИНДУСТРИЯ 4.0». Ч. 2. Control Engineering Россия, #1 (91), 2021.

6. ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 19791-2008. Информационная технология. Оценка безопасности автоматизированных систем.

7. ГОСТ Р 56205-2014. Сети промышленной коммуникации. Безопасность сетей и систем.

8. ГОСТ Р 59853-2021. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения.

9. ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012.Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Ч. 1-7.

10. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27000-2021. Информационные технологии. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Общий обзор и терминология.

11. Глоссарий Gartner. URL: https://www.gartner.com/en/glossary (дата обращения: 05.01.2023).

12. *Скляр В.* Информационная безопасность АСУ ТП: Дон Кихот в эру кибероружия. URL: https://habr.com/en/post/316184 (дата обращения: 05.01.2023).

УДК 004.021 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-37-41**

Д. А. Зырянов*
студент
С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
Е. М. Бадика*
студент
А. П. Бобрышов*
аспирант
В. П. Кузьменко*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ И РЕШЕНИЯ ОЧЕРЕДИ С ПРИОРИТЕТАМИ

Автоматизация производств, складов, инфраструктуры, объемное внедрение роботов и других автоматических систем требует создание алгоритмов, позволяющих организовать все ресурсы в единую структуру. Интеграция алгоритмов очередей позволяет ускорить обработку информации, избежать возможных ошибок, правильно организовать работу роботов, оборудования, станков. Алгоритм для построения и решения очереди с приоритетами может существенно сэкономить ресурсы систем и время.
Ключевые слова: *автоматизация, алгоритм, очередь, приоритет, структура данных.*

D. A. Zyryanov*
Student
S. V. Solyonyj*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
E. M. Badika*
Student
A. P. Bobryshov*
PhD Student
V. P. Kuzmenko*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

INVESTIGATION OF THE THEORETICAL RESULTS OF THE ALGORITHM FOR CONSTRUCTING AND SOLVING A QUEUE WITH PRIORITIES

Automation of production facilities, warehouses, infrastructure, large-scale introduction of robots and other automatic systems requires the creation of algorithms that allow organizing all resources into a single structure. The integration of queue algorithms allows you to speed up information processing, avoid possible errors, and properly organize the work of robots, equipment, and machines. An algorithm for building and solving a queue with priorities can significantly save system resources and time.
Keywords: *automation, algorithm, queue, priority, data structure.*

В последние годы автоматизированные системы все чаще встречаются на производствах, в службах доставки, обработки информации, появляется потребность в решении задач, где при малом количестве исполнителей существует много ресурсов. Сейчас данные задачи зачастую решаются людьми, однако программы могут ускорить обработку информации и минимизировать ошибки.

Внедрение автоматических систем для решения таких задач также позволяет комплексно внедрять роботизированные системы и ЧПУ. Например, в последнее время все чаще на производствах и складах используются мобильные роботы, эффективность работы которых определяется правильностью выданных задач и оптимальностью маршрута. Все это в большинстве случаев точнее выполняет компьютер – об-

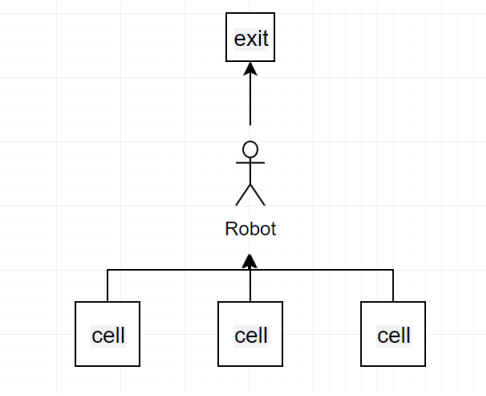


Рис. 1. Схема склада

щий контроллер транспортной, складской системы.

Наглядным примером задачи с ограниченными исполнителями является система склада, где имеется пара роботов и большое количество ячеек. В ячейках могут появляться заказы, которые необходимо доставить до конечного пункта, допустим, до грузовика. На рис. 1 показана нехватка исполнителей в данном случае.

Для решения данной задачи применяются определенные структуры данных:

– стек – система, в которой всегда берется последний добавленный объект;

– очередь – система, в которой объекты добавляются в конец, но берутся с начала;

– дерево – нелинейная иерархическая структура данных;

– хеш-таблицы – структура данных, в которой все элементы хранятся в виде пары ключ-значение;

Решения схожи с алгоритмами распределения памяти, которые попадают под определение нашей задачи, но в большинстве случаев они линейны.

Рассмотрим подробнее различные структуры данных.

Стек является очень удобной структурой, не требующих больших затрат мощностей, строится по принципу LIFO (*Last In First Out* – «последним пришел – первым ушел»), является очень быстрым, временная сложность O(1). Однако во многих задачах автоматизации, как, например, в приведенном варианте склада, при помощи данной системы нельзя будет правильно распределить объекты во времени. Такое решение будет недопустимо в ситуациях, когда приоритет находится у объектов с более ранним временем добавления – к примеру, в службах доставки, курьерских службах, потому в настоящее время вряд ли будет выгодно применять эту структуру.

Очередь – структура, в которой объекты добавляются в конец, а берутся в начале подчиняется правилу FIFO. Она чаще всего встречается в реальной жизни, а потому ее интегрирование имеет повышенный приоритет. В ней на отправку идут объекты, время добавления которых самое раннее.

Сама по себе очередь делится на подвиды:

– простая очередь;

– круговая: последний элемент указывает на первый, это дает более эффективное использование памяти, может комбинироваться с другими видами очередей;

– очередь с приоритетами: вставка зависит от переданного значения элемента, удаление же происходит исходя из ее приоритета;

– двухсторонняя очередь: вставка и удаление элементов может происходить как с начала, так и с конца очереди; то есть она не подчиняется принципу FIFO.

Дерево – сложная неоднородная структура, которая позволяет эффективно решать нелинейные задачи. Однако алгоритмы обхода деревьев имеют большую временную сложность, чем у других структур, потому их применение в задачах, рассматриваемых в статье, редко целесообразно. Чаще всего они применяются в системах с явно выраженной иерархической структурой.

Хеш-таблицы – система, в которой объекты добавляются всегда в определенные места и берутся в определенной последовательности; в зависимости от мест в реальной жизни может быть представлена складами, заводами, городами – структурами, где объекты всегда находятся на определенных местах или маршруты представляют собой графы. Однако из-за того, что требуется однозначное определение ключа, значение не всегда удается внедрить в такую структуру. Хоть скорость выполнения алгоритмов, основанных на хеш-таблицах, и имеют сложность O(1), в нашем случае при обходе свободных ключей все равно будет сложность O(n).

Чаще всего такие системы решают с помощью алгоритмов нахождения кратчайшего пути (например, алгоритма Дейкстры) или путем круговых маршрутов (рис. 2), которые в свою очередь основываются на структуре очереди с приоритетами. Потому использование такой структуры будет самым выгодным для решения нашей задачи.

В реальных системах ячейки или сами объекты доставки неоднородны, а потому выбор объектов для доставки может быть осложнен определением дополнительных условий. Например, в службе доставки есть посылки перво-

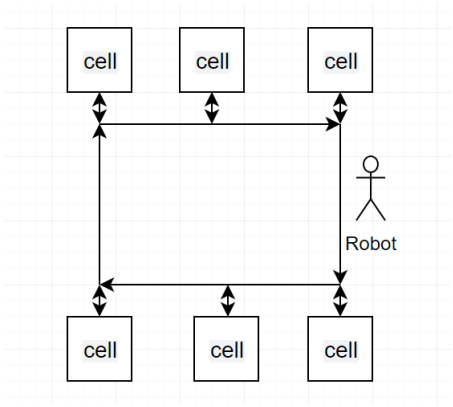


Рис. 2. Круговой маршрут доставки

го класса, второго и т. д. В таких условиях необходимо вводить систему приоритетов. Однако тогда алгоритм по проверке каждого объекта в очереди будет иметь сложность T=O(n). При сложных многомерных структурах сложность алгоритма будет только возрастать, соответственно, появляется потребность в оптимизации подобных алгоритмов.

Сформируем обобщенную задачу, в которой необходимо применить алгоритм автоматизированной очереди с приоритетами.

Наш склад имеет ярусную систему. Робот может в любой момент забрать объект с первого яруса. Значит, у данного яруса будет наименьший приоритет.

Для второго и третьего яруса необходим средний погрузчик, таких на складе два. Для последних ярусов нужен большой погрузчик, он один. Значит, объекты с последних ярусов будут дольше готовиться к отправке, следовательно, отслеживание того, как освободится большой погрузчик, для нашей системы является приоритетным.

Таким образом, наша очередь делится на три приоритета: 0 – верхние полки, 1 – средние полки, 2 – нижние полки. (Нумерация начинается с 0 для упрощения реализации алгоритмов.) Добавим также тип объекта, хранящегося в ячейке: инструмент, деталь, материал.

Заполним нашу очередь на n объектов для проверки алгоритмов (сделаем допущение, что объекты были добавлены по времени). Код на языке Python приведен на рис. 3.

Для простой проверки очереди необходимо воспользоваться циклом for. Код на языке Python приведен на рис. 4.

В данном примере функция Grab() дает задание роботу на взятие данного объекта. Булевые переменные Big_robot_is_available и Middle_robot_is_available отслеживают состояние погрузчиков.

```
Queue = []
Types = ['Tool', 'Part', 'Material']
n = 10000
for i in range(n):
  type = Types[randint(0,2)]
  priority = randint(0,2)
  cell = randint(0,100)
  Queue.append([cell, priority, type])
```

Рис. 3. Код для создания простой очереди на Python

```
def MoveQueue():
  if Queue !=[]:
    for i, Q in enumerate(Queue):
      if Q[1] == 0 and Big_robot_is_available:
        Grab(Q)
        Queue.pop(i)
      elif Q[1] == 1 and Middle_robot_is_available:
        Grab(Q)
        Queue.pop(i)
      elif Q[1] == 2:
        Grab(Q)
        Queue.pop(i)
```

Рис. 4. Код для обработки простой очереди на Python

В ситуации, когда в очереди нет объектов со вторым приоритетом и все погрузчики заняты, алгоритму придется пройтись по всем n объектам очереди. Отсюда и сложность T=O(n). Обобщенный алгоритм для этого случая представлен на рис. 5.

Для решения задачи оптимизации необходимо ввести дополнительное требование: со-

Рис. 5. Алгоритм прохода по очереди

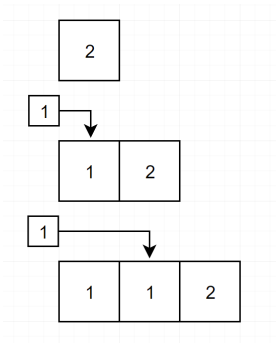


Рис. 6. Добавление в очередь

```
Queue = []
Priority_num = [0, 0, 0]
Types = ['Tool', 'Part', 'Material']
n = 10000
for i in range(n):
  type = Types[randint(0,2)]
  priority = randint(0,2)
  cell = randint(0,100)
  Queue.insert(sum(Priority_num[:priority+1]), [cell, priority, type])
  Priority_num[priority] += 1
```

Рис. 7. Код для создания очереди с приоритетами на Python

ртировка очереди путем добавления объектов не в конец очереди, а в конец своего приоритета. Допустим, наша очередь пуста. Первый объект с приоритетом 2. Следующий объект с приоритетом 1 – мы добавляем его в начало очереди. Дальше снова объект с приоритетом 1 – мы добавляем его вторым, таким образом, объект с приоритетом 2 уже становится 3. И так далее.

Также нам необходимо вести подсчет того, сколько объектов определенного приоритета у нас существует (Piority_num). Это требует дополнительных затрат памяти, однако затрачиваемая память зависит только от количества приоритетов, а не от количества объектов. Также это окупается быстродействием системы. На рис. 7 представлен код для формирования приоритетной очереди.

Здесь видно, что использование массива для подсчета количества объектов определенного приоритета облегчает подсчет индексов и определение необходимого приоритета. (Поэтому необходимо использовать приоритеты, начиная с 0.)

```
def MoveQueue():
  if Queue !=[]:
    if Big_robot_is_available and Priority_num[0] > 0:
      ind = 0
      obj = Queue[ind]
      Grab(obj)
      Queue.pop(ind)
    elif Middle_robot_is_available and Priority_num[1] > 0:
      ind = sum(Priority_num[:1])
      obj = Queue[ind]
      Grab(obj)
      Queue.pop(ind)
    elif Priority_num[2] > 0:
      ind = sum(Priority_num[:2])
      obj = Queue[ind]
      Grab(obj)
      Queue.pop(ind)
```

Рис. 8. Код для обработки очереди с приоритетами на Python

Тогда код алгоритм для проверки очереди будет иметь вид, как на рис. 8.

Блок схема алгоритма представлена на рис.9.

Здесь видно, что для решения очереди не понадобились циклы, потому что в при отсортированной очереди алгоритм будет линейным. Следовательно, сложность алгоритма будет определяться только количеством приоритетов, но не количеством объектов в очереди, T=O(1). Для большого количества приоритетов или сложных условий могут применяться циклы, однако в большинстве случаев можно избежать их использования.

Для сравнительного анализа алгоритмов протестируем их для нахождения объекта с 1 приоритетом (в случае когда большой погрузчик занят, а средний свободен) для различных n: 1, 10, 100, 1000, 10 000, 100 000, 1 000 000. Результат представлен на рис. 10.

Видно, что с увеличением количества объектов время работы первого алгоритма пропорционально растет, в то время как время работы второго алгоритма с приоритетами постоянно и составляет всего несколько миллисекунд, когда ра-

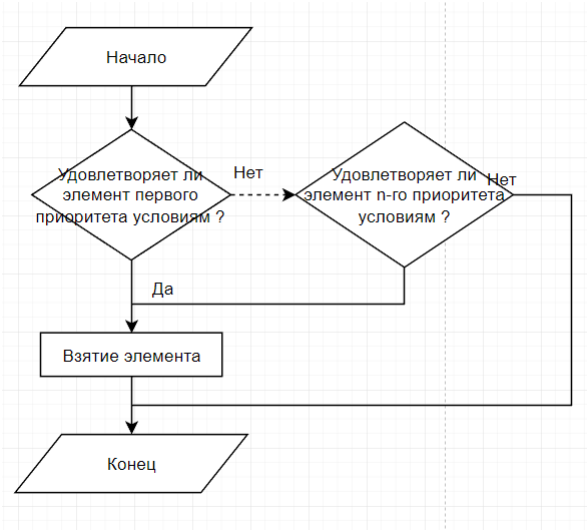


Рис. 9. Алгоритм прохода по очереди при подсчете элементов по приоритетам

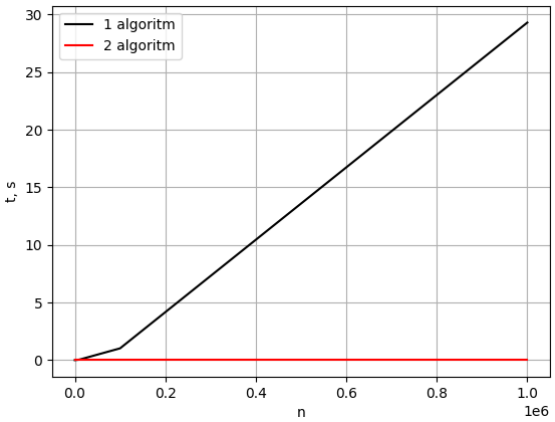


Рис. 10. Время работы алгоритмов

бота 1 алгоритма занимает уже десятки секунд. Это говорит о целесообразности использования данного алгоритма для реализации очередей.

Также реализация данного алгоритма для программиста проста и не требует специальных знаний. С точки зрения ресурсов, как было сказано раннее, такой алгоритм выгоден, поскольку потребляет определенное постоянное количество памяти, зависящее только от количества приоритетов. В большинстве случаев потребляемая память на подсчет приоритетов будет числом постоянным.

Такие очереди могут применяться в различных системах и структурах, начиная автоматизированными складами, заканчивая цифровыми двойниками, где проблема очереди стоит особенно остро из-за ограничений работы программ, внутренних алгоритмов, проблемы нехватки ресурсов и сложных просчетов. Так, например, эти алгоритмы можно применять при разработке сложных маршрутов в Delfoi Robotics и Visual Components; в программах ПЛК при работе в TIA Portal, Tecnomatix. Такие алгоритмы найдут применение в транспортных системах, складских системах, в больших базах данных заказов. Во многих программных продуктах применение очередей позволит решить многие задачи, в частности, там, где участие человека невозможно (невозможно его влияние на симуляцию).

Список источников

1. *Алексеев В. Е., Таланов В. А.* Графы и алгоритмы. Структуры данных. Модели вычислений. М.: Интернет-университет информационных технологий, 2006.

2. *Вирт Н.* Алгоритмы и структуры данных. Новая версия для Оберона+ CD., 2010.

3. *Гусаров А. А., Ерохин А. В.* Структуры данных: основные типы // Научный вектор: Сб. научных трудов магистрантов / Под ред. А. У. Альбекова. Ростов-на-Дону: Ростовский государственный экономический университет «РИНХ», 2016. С. 169–174.

4. *Кубенский А.* Создание и обработка структур данных в примерах на Java. СПб.: БХВ-Петербург, 2001.

5. Структуры данных // CodeChick.io. URL: https://codechick.io/tutorials/dsa/dsa-stack (дата обращения: 03.01.2023).

УДК 57.087.1 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-42-45**

В. С. Коломойцев*
кандидат технических наук, доцент
А. И. Альмухамедов*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧИ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПО РИСУНКУ ВЕН ЛАДОНИ

В ходе исследования предложен алгоритм обработки изображений для задачи биометрической идентификации и скелетизированного изображения, позволяющий выделить основной Рис.вен и избавиться от шума на изображении. Присутствие шума на скелетизированном изображении может помешать дальнейшему процессу идентификации, поэтому изображения скелетизированного рисунка вен одного человека должны быть достаточно похожими друг на друга, чего и позволяет добиться разработанный алгоритм.
Ключевые слова: *биометрия, идентификация, Рис.вен ладони, скелетизация, бинаризация, область интереса, сегментация.*

V. S. Kolomoitsev*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. I. Almukhamedov*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

IMAGE PROCESSING ALGORITHM FOR THE PROBLEM OF BIOMETRIC IDENTIFICATION BASED ON THE PATTERN OF PALM VEINS

In paper propose an image processing algorithm for the task of biometric identification. An algorithm for processing a skeletalized image is proposed, which makes it possible to highlight the main pattern of veins and get rid of noise in the image. The presence of noise in the skeletonized image can interfere with the further identification process, so the images of the skeletonized vein pattern of one person should be sufficiently similar to each other, which is what the developed algorithm allows to achieve.
Keywords: *biometrics, identification, palm vein pattern, skeletonization, binarization, region of interest, segmentation.*

Введение

На сегодняшний день средства биометрической идентификации широко используются во всем мире. Существует множество способов биометрической идентификации личности. Среди наиболее распространенных можно отметить методы, использующие в качестве идентификатора двухмерное и трехмерное изображение лица, отпечаток пальца, запись голоса, изображение радужки или сетчатки глаза и другие [1]. Одним из перспективных методов является метод идентификации по рисунку вен [2]. Данный метод основан на свойстве крови, обедненной кислородом, поглощать излучение в ближнем инфракрасном диапазоне. Такое же свойство используется и в методе сканирования сетчатки, что делает его одним из наиболее точных методов, однако обладает существенным недостатком в виде дискомфорта сканирования для пользователя. Метод идентификации по рисунку вен ладони является бесконтактным и лишен этого недостатка.

Изображение в инфракрасном (ИК) спектре получается с помощью специального сканера, включающего в себя матрицу, чувствительную к ИК-диапазону, ИК-фильтр и ИК-диоды [3]. Ладонь может находиться на разном расстоянии от сканера, а также под разным углом, поэтому перед идентификацией необходимо произвести обработку полученного изображения. Обработка заключается в выделении области интереса или ROI (от англ. *region of interest*), сегментации, бинаризации и скелетизации. Ранее было спроектировано сканирующее устройство, использующее длину волны 850 нм для снятия изображений, а также программное обеспечение для выделения области ROI и сегментации, использующее нейросетевые алгоритмы для определения ключевых точек. Дальнейшая

предварительная обработка изображений зависит от применяемого метода идентификации.

На сегодняшний день в области идентификации по рисунку вен наиболее известен метод, основанный на вычислении модифицированного расстояния Хаусдорфа, примененного к конечным и узловым точкам скелетизированного изображения вен [4]. Однако при простоте вычисления и малом количестве хранимых данных данный метод крайне неустойчив к повороту ладони, что является его основным недостатком. Методы, основанные на применении сверточных нейронных сетей, лишены этого недостатка. При этом существуют решения, использующие как сегментированное изображение без обработки или с применением операций изменения размера, яркости и контраста, так и сегментированное изображение, прошедшее операции бинаризации и скелетизации [5], [6]. В большинстве случаев предпочтение отдается последним, поскольку такой метод менее зависим от освещения. Таким образом, несколько снимков ладони одного и того же человека в скелетизированном виде будут наиболее схожи. Но дефекты освещения, а также температуры, так как сосуды и вены расширяются и сужаются при ее изменении, могут оказать влияние на скелетизированное изображение [7]. В данной работе предложен алгоритм предварительной обработки изображения для идентификации по рисунку вен, в частности, алгоритм обработки скелетизированного изображения.

Рис. 1. Алгоритм предварительной обработки изображения

Предварительная обработка изображения

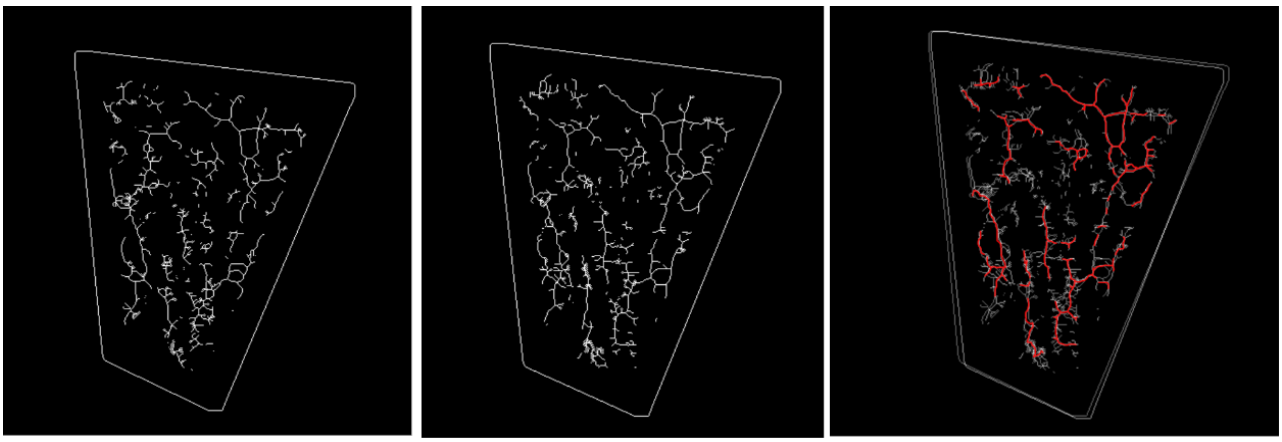
Предварительная обработка включает в себя поиск области ROI, сегментацию и цифровую обработку, в которую входит бинаризация и скелетизация и другие. Алгоритм предварительной можно увидеть на рис. 1.

Перед тем как выделить область интереса, изображение подвергается операциям размытия и гамма-коррекции, чтобы избавиться от лишнего шума и выделить темные участки изображения, среди которых также находятся и вены. В процессе поиска области ROI выделяется область поверхности ладони и четыре ключевых точки, которые представляют из себя кистевой сустав, суставы мизинца и большого и указательного пальца. Алгоритм сегментации позволяет получить область ROI, ориентированную от сустава кисти к фалангам пальцев снизу вверх. После этого этапа начинается сама экстракция рисунка вен из изображения поверхности ладони. Для этого изображение бинаризируется. Существует множество способов бинаризации, имеющих свои достоинства и недостатки, однако данная работа ограничивается методом бинаризации Оцу, как методом, наиболее часто встречающемуся в области идентификации по рисунку вен [8], [9]. За этапом бинаризации следует выполнить операцию эрозии, чтобы избавиться от мелких участков, не принадлежащих венам.

Этап скелетизации позволяет представить вены как сплетение линий толщиной в один пиксель. Эта операция необходима, поскольку в зависимости от освещения и температуры вены на изображении могут изменяться в размере. Существует множество алгоритмов скелетизации, но в данной работе предлагается использовать модифицированный алгоритм Зонга – Суня [10], поскольку он позволяет получать графы толщиной в один пиксель.

Результат, получаемый на выходе из алгоритма скелетизации, можно увидеть на рис. 2*а*, *б*.

Стоит отметить, что этап сегментации в данном случае опущен для удобства восприятия. Данные изображения получены с интервалом в 10 секунд. На рисунках видно, что даже малейшее изменение в исходном изображении ведет к появлению новых отрезков, которые не являются венами. На рис. 2*в* представлено наложение двух изображений, где показаны участки, совпадающие для обоих изображений.



а б в

Рис. 2. Сравнение скелетизированных изображений

Для дальнейшей работы алгоритма идентификации необходимо, чтобы скелетизированные изображения ладони одного и того же человека были максимально похожи. Поэтому далее предложен алгоритм, позволяющий избавиться от лишних отрезков, появляющихся в процессе скелетизации.

Обработка скелетизированного изображения

Алгоритм обработки скелетизированного изображения заключается в выделении основных линий рисунка вен и избавлении от лишних отрезков. Подробно алгоритм представлен на рис. 3.

Избавление от ненужных отрезков происходит путем прохода по изображению маской размером 3 × 3. Как только в область маски попадает белый пиксель, маска ставится центрально относительно этого пикселя. Данный пиксель записывается в счетчик. Проверяются все соседние пиксели. Если у пикселя есть соседи, еще не записанные в счетчик, то маска передвигается на них. Если у пикселя нет не посещенных соседей или у пикселя больше двух соседей, то эти пиксели считаются узловыми. Если между узловой точкой, не имеющей соседей, и любой другой узловой точкой менее R точек, такой отрезок стирается. Затем счетчик обнуляется, а маска встает в положение, которое предшествовало первой точке в обработанном отрезке. Уже учтенные отрезки далее не обрабатываются. Входное изображение и результат работы алгоритма изображены на рис. 4*а*, *б*.

Как можно заметить на рис. 4*б*, рисунок вен ладони стал более четким, на изображении исчезли мелкие отрезки, не несущие информации о рисунке вен. Стоит отметить, что параметр R

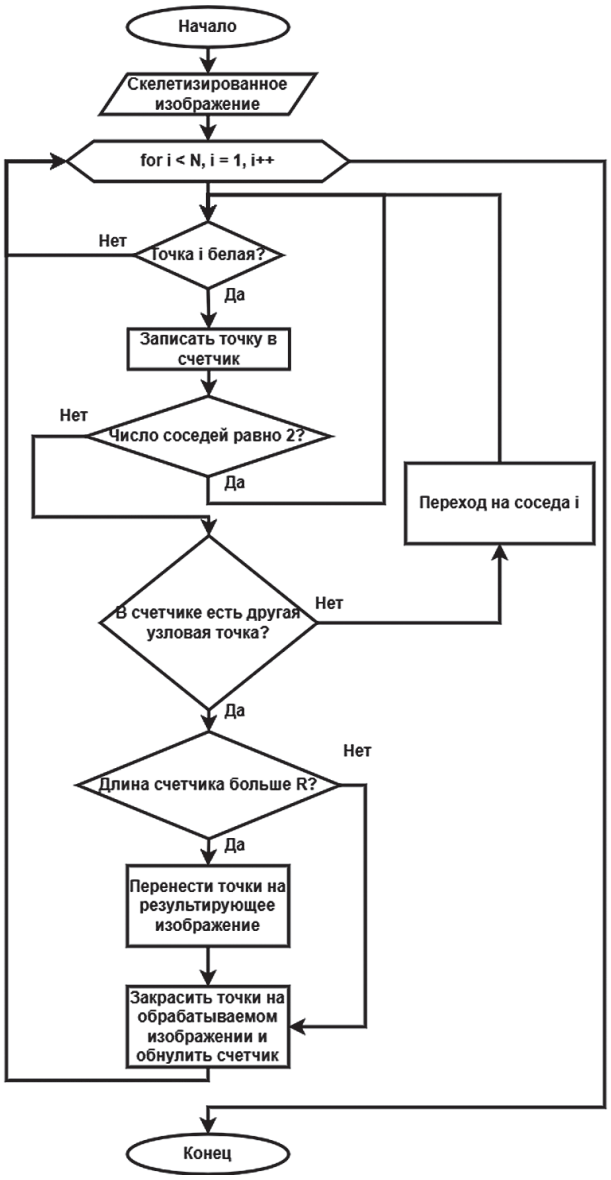
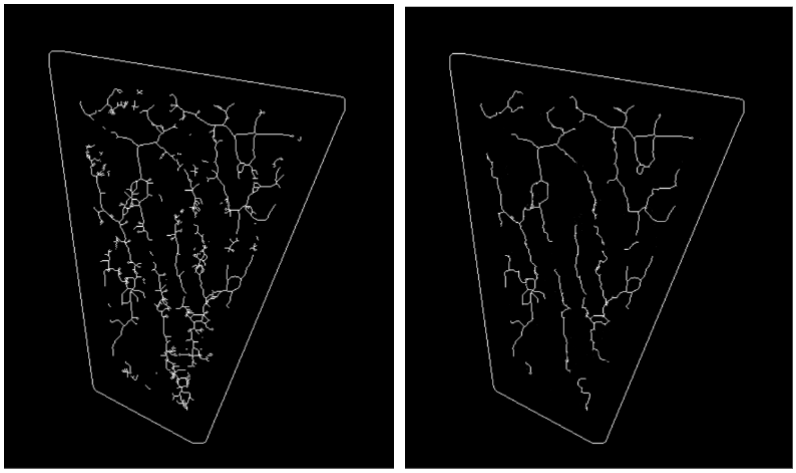


Рис. 3. Блок-схема обработки скелетизированного изображения



а б

Рис. 4. Изображения рисунка вен: а – до обработки; б – после обработки

алгоритма подбирается в зависимости от размера изображения и от сканирующего устройства, но не зависит от расстояния до ладони, поскольку в процессе сегментации область ROI подгоняется под заранее заданный размер изображения.

Заключение

В данной работе предложен алгоритм предварительной обработки изображения для задачи идентификации по рисунку вен ладони. А также предложен алгоритм обработки скелетизированного изображения, позволяющий выделить основные направления рисунка вен и избавиться от лишних отрезков, которые появляются из-за изменений в температуре и освещении помещения при снимке ладони одного и того же человека. Присутствие шума на скелетизированном изображении может помешать дальнейшему процессу идентификации, поэтому изображения скелетизированного рисунка вен одного человека должны быть достаточно похожими друг на друга. Дальнейшая работа может быть направлена на решение задачи идентификации и разработку алгоритма идентификации, использующего скелетизированный рисунок вен.

Список источников

1. *Alwahaishi S., Zdrálek J.* Biometric Authentication Security: An Overview // 2020 IEEE International Conference on Cloud Computing in Emerging Markets (CCEM). 2020. P. 87–91.

2. *Коломойцев В. С., Ерышов В. Г., Альмухамедов А. И.* Идентификация по рисунку вен ладони как перспективный метод биометрической идентификации // Сб. докладов Второй Междунар. научной конф., Санкт-Петербург, 11–15 апреля 2022 года. СПб., 2022. С. 253–255.

3. *Баранов С. О., Абрамов Д. Б.* Технология биометрической аутентификации пользователя по венозному рисунку кистей рук // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2017. № 2 (54). С. 134–139.

4. *Морозов К. С., Васюков В. Н.* Применение модифицированного расстояния Хаусдорфа в задачах идентификации личности по рисунку вен ладони и запястья // Сб. научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2019. № 3–4 (96). С. 177–186.

5. *Fanjiang Y., Lee C., Du Y.* Palm Vein Recognition Based on Convolutional Neural Network // Informatica. 2021. N 32 (4). P. 687–708.

6. *Jain R., Itkarkar S., Patil S.* Recognition using palm vein detection // International journal of multidisciplinary educational research. 2022. P. 95–98.

7. *Полякова Е. Н., Дорофеева А. С.* Обзор современных систем разграничения доступа к ресурсам вычислительной системы // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. 2016. № 3 (42). С. 122–127.

8. *Горитов А. Н.* Сравнительный анализ методов бинаризации изображений // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2019. № 1-2. С. 66–69.

9. *Dubey N.* Digital Image Restoration of Historical Devanagari Manuscripts // Computational Intelligence: Theories, Applications and Future Directions. 2019. N 2. P. 571–583.

10. *Мохаммед З.* Модификация алгоритма скелетизации Зонга – Суня для задачи распознавания рукописных символов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6. № 1 (20). С. 99–107.

УДК 004.056.4 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-46-50**

В. С. Коломойцев*
кандидат технических наук, доцент
Г. А. Грузденков*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ XZ-АРХИВАЦИИ В МЕТОДЕ МНОГОУРОВНЕВОГО ДОСТУПА К ДОКУМЕНТАМ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА

Работа посвящена анализу метода многоуровневого доступа к документам в системах электронного документооборота на возможность модификации. В работе представлено описание метода, а также предлагается концепция использования более продвинутых алгоритмов с целью сокращения занимаемого дискового пространства документами, а также передаваемых данных в канале связи. Использование модификации в составе метода потенциально позволит снизить затраты на дополнительное дисковое пространство и нагрузку на канал связи.
Ключевые слова: *средства архивации; защита информации; средства защиты информации; система электронного документооборота; информационная безопасность.*

V. S. Kolomoitcev*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
G. A. Gruzdenkov*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE USING XZ-ARCHIVING TO THE METHOD OF MULTI-LEVEL ACCESS TO DOCUMENTS IN ELECTRONIC DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEMS

The paper is devoted to analyzing the method of multilevel access to documents in electronic document management systems for the possibility of modification. The paper considers a description of the method and also offers the concept of using more advanced compression algorithms to decrease the disk space occupied by documents, as well as transmitted data in the communication channel. Using a modification as a part of the method will potentially reduce the cost of additional disk space and the load on the communication channel.
Keywords: *archiving means; information protection; information protection means; electronic document management system; information security.*

Введение

Обмен электронными документами занимает значимое место среди механизмов, поддерживающих работу любой организации. Современные системы электронного документооборота обеспечивают высокую надежность при передаче документов по каналу связи и их хранении. Однако такие системы состоят из большого количества компонент, назначение которых, заключается в выполнении задач, отличных от первостепенной задачи. Более того, увеличение числа дополнительных функций системы электронного документооборота может существенно влиять на время передачи документа, обрабатываемого в системе. Это связано с тем, что для нормальной работы этих функций необходимо вносить изменения в структуру документа, закономерно приводя к увеличению его объема.

Одним из способов, позволяющих решить ряд проблем, возникающих при работе со сложными по своей структуре и свойствам документами в системах электронного документооборота, может стать использование метода многоуровневого доступа к документам в системах электронного документооборота [1]. Метод позволяет повысить гибкость администрирования документа, что в конечном итоге существенно сказывается на защищенности

документа в целом. Рассмотрим работу метода подробнее с целью выявления его недостатков.

Описание метода многоуровневого доступа

В общем виде метод предполагает разметку документа некоторым набором идентификаторов областей. Таким образом, документ будет представлять собой множество сгруппированных страниц по принципу принадлежности их к соответствующему идентификатору. Такой подход возможен благодаря реализации формата «docx» через zip-архив, содержащий множество xml-документов, предназначенных для хранения информации в документе, ее структуризации и представлении всего документа в целом.

Идентификаторы вставляются в начале и в конце информационных блоков основного xml-файла под названием «document.xml», хранящий в себе содержание документа. Таким образом, при чтении документа, размеченным этим способом, выделяются открывающие и закрывающие тэги идентификаторов, а вся информация, находящаяся между ними, считается областью разметки. Дополнительно отметим, что информация внутри xml-формата структурируется путем ее заключения в логические блоки, так называемые открывающие и закрывающие тэги. Пример структурного представления docx-документа с разметкой и без нее представлен на рис. 1.

Обмен документами происходит следующим образом:

– пользователь запрашивает документ с сервера;

– сторона сервера проверяет наличие прав у пользователя, по существу являющееся областями разметки (происходит проверка идентификаторов областей);

– серверное приложение обращается к размеченному документу, одновременно формируя новый документ из страниц, соответствующих идентификаторам областей;

– вновь сформированный документ содержит в себе всю информацию к которой допущен пользователь, поэтому далее происходит его отправление пользователю.

Когда пользователь закончил работу с выделенной частью, измененный фрагмент отправляется на сторону сервера, где снова произойдет проверка соответствия идентификаторов и областей разметки основного документа. В найденные области скопируется информация из документа пользователя, что и обозначает завершение работы пользователя с документом. Пример выделения пользователям, соответствующих им частей документа, представлен на рис. 2.

Пример получения сервером измененных пользователями фрагментов представлен на рис. 3.

Стоит отметить, что метод путем внедрения областей разметки внутрь самого документа позволяет удобно и быстро формировать документ необходимого уровня безопасности с точки зрения защиты от несанкционированного доступа. Однако у метода имеется существенный недостаток, проявляющийся в увеличении объема итогового документа. Очевидно, что при возрастании числа областей разметки закономерно будет увеличиваться и объем основного документа, хранящего в себе всю информацию о разметке. Так, если число областей невелико, допустим несколько, тогда увеличение размера можно не заметить вовсе. Однако при наличии порядка сотни областей эффект начнет существенно сказываться на за-

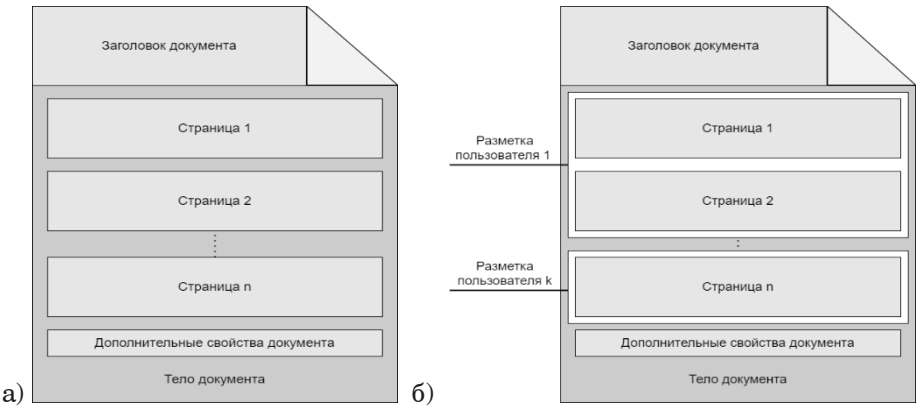


Рис. 1. Структура документа: а – .docx в формате xml; б – внедренная разметка в document.xml

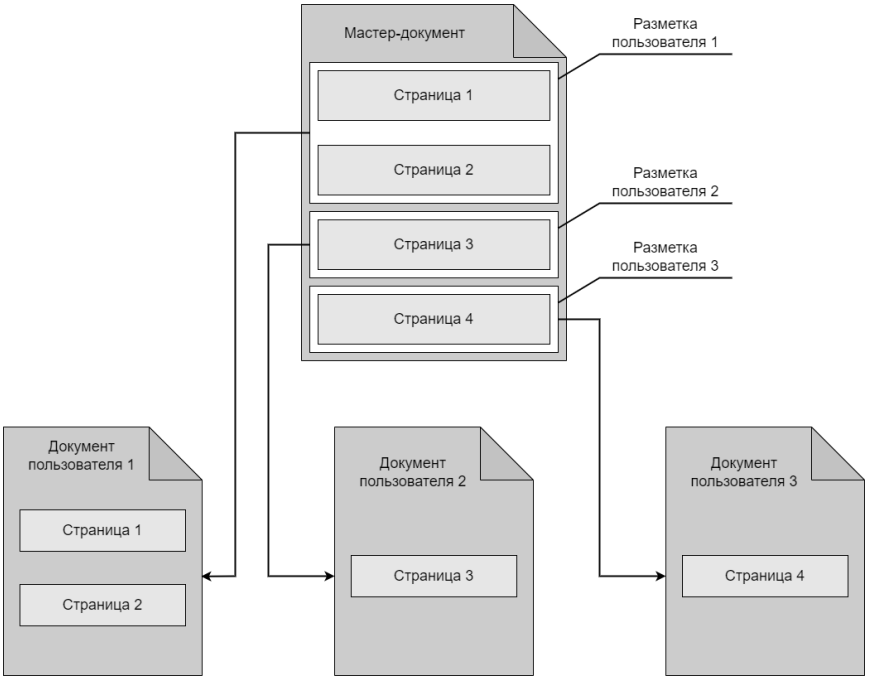


Рис. 2. Схема разделенного доступа к документу (выдача)

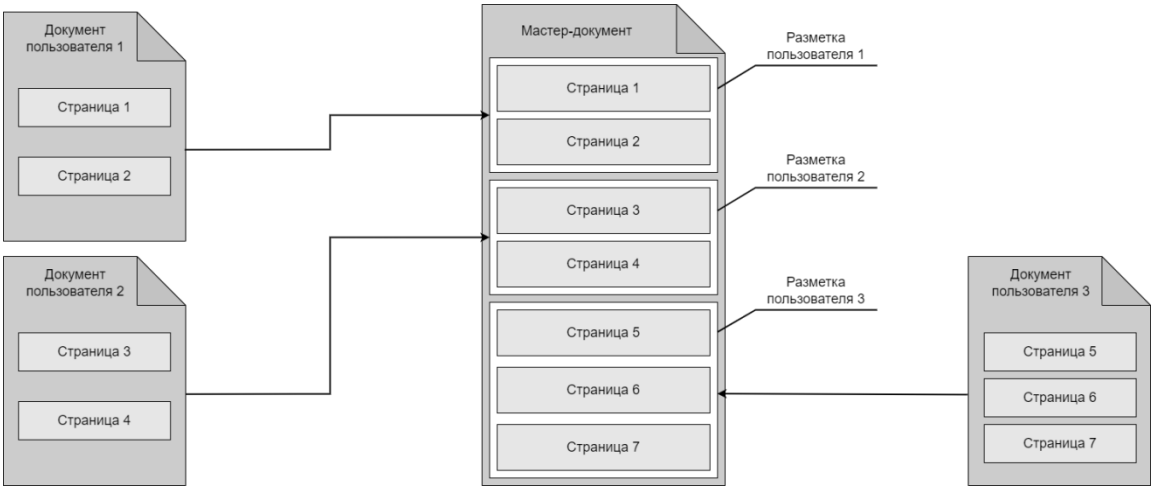


Рис. 3. Схема разделенного доступа к документу (получение)

нимаемом объеме документа на сервере. Помимо этого, если рассмотреть частный случай, когда пользователь имеет доступ ко всему документу целиком, эффект сокращения нагрузки на канал связи не достигается вовсе. Связано это в первую очередь с тем, что пользователю высылается не какая-то часть документа, а сразу весь, одним целым.

В связи с этим одним из решений по повышению эффективности описываемого метода может стать разработка подхода к сокращению объема документа путем повторной архивации документов, размеченных методом многоуровневого доступа.

Подход к сокращению объема документа

Метод многоуровневого доступа опирается на использовании docx-документов, которые, как уже было замечено, являются zip-архивами. Несмотря на широкое распространение, zip-формат существенно проигрывает по эффективности сжатия форматам, основанным на более продвинутых алгоритмах.

Наиболее часто в основе zip-архивации лежит алгоритм Deflate. Он основан на комбинации таких известных алгоритмов, как LZ77 и алгоритм Хаффмана. Хотя эти алгоритмы давно доказали свою эффективность, сегодня су-

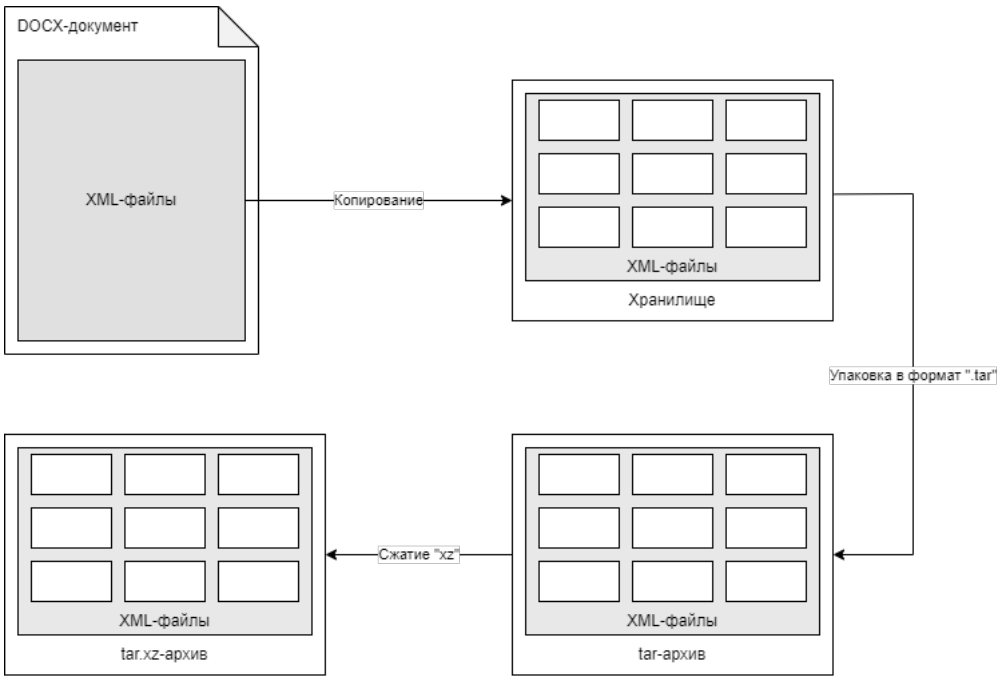


Рис. 4. Схема извлечения содержания docx-документа с последующей tar.xz-архивацией

ществует алгоритмы, развивающие изначальные концепции своих прародителей и вместе с тем выполняющие лучше задачу сжатия данных без потерь. Один из таких алгоритмов можно использовать для предлагаемого подхода – это LZMA2, лежащий в основе сжатия xz-форматом.

Сегодня xz-сжатие является самым эффективным по степени сжатия практически любого формата исходных данных. Однако, в отличие от других популярных форматов, в частности, от zip-формата задача xz-формата состоит исключительно в сжатии, что означает невозможность получения сжатых архивных данных одним пакетом без привлечения сторонних форматов. Для разрешения этого недостатка отлично подходит tar-формат. Его функция как раз и состоит в упаковке данных в один пакет без применения сжатия. Видно, что эти два формата отлично дополняют друг друга и наиболее эффективны при совместном использовании.

Исходя из всего вышесказанного подход, использующий XZ-архивацию для метода многоуровневого доступа, будет заключаться в следующем:

– основной документ, находящийся на стороне сервера, с разметкой областей теперь должен хранится в tar-формате, сжатом xz-форматом;

– при необходимости произвести обработку размеченного документа он предварительно проходит процедуру обратную сжатию и разархивируется;

– документы, создаваемые по запросу пользователей, вместо zip-формата, теперь упаковываются в tar-формат с последующем сжатием xz-формата;

– полученные пользователями документы «разжимаются» и распаковываются, после чего вновь упаковываются в zip-формат MS Word, то есть в docx-формат. При отправлении документа на сервер, происходит обратная процедура.

На рис. 4 показана схема tar.xz-архивации содержимого docx-документа.

Ввиду сокращения объема хранимых и передаваемых документов, снижаются затраты на обеспечение дополнительного дискового пространства сервера, а также сокращается нагрузка на канал связи при обмене документами. Однако использование подхода влечет за собой затраты на дополнительные вычислительные ресурсы для обработки и «переархивации» документов в новом для метода формате как на стороне сервера, так и на стороне клиента.

Заключение

В работе приведено краткое описание метода многоуровневого доступа к документам в системах электронного документооборота, а также предложен подход устраняющий часть недостатков указанного метода. Подход предполагает сокращение объема документа на дисковом пространстве путем использования для хране-

ния и передачи документов более продвинутых алгоритмов сжатия в составе tar.xz-архивов.

Список источников

1. *Коломойцев В. С., Грузденков Г. А.* Метод многоуровневого доступа к документам в системах электронного документооборота // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Сб. статей XXV Междунар. науч. конф: в 3 ч. Ч. 3. СПб.: ГУАП, 2022. С. 44–49.

2. *Blyth A., Cunliffe D., Sutherland I.* Security analysis of xml, xml usage and xml parsing // Computers & security. 2003. N 6. Vol. 22. P. 494.

3. *Ширяев В. В., Турчановская А. В.* Извлечение текстовых данных из документов формата pdf, docx (doc) с помощью сторонних библиотек // Труды семинара по геометрии и математическому моделированию. 2019. № 5. С. 158–160.

4. *Шавловский А. Б.* Исследование файлов текстовых форматов на примере форматов rtf, doc, docx // Молодежный научно-технический вестник. 2015. № 10. С. 68.

5. *Бровкина А. С.* Программа архиватор 7-zip // Форум молодых ученых. 2017. № 1. С. 123–124.

6. *Петрянин Д. Л., Меркульев А. Ю., Кочегаров И. И.* Анализ архиваторов // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. 2014. № 1. С. 498–501.

7. *Ерофеев И. М.* Первые программы-архиваторы // Молодежь в науке. Новые аргументы: Сб. научных работ V Междунар. молодежной конф. Липецк, 2020. С. 15–18.

8. Исследование архиваторов с функцией анализа эффективности сжатия данных / Д. Л. Петрянин, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков, А. Г. Дмитриенко // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2015. Т. 2. С. 136–138.

9. *Трубецкой К. С., Ягодкин Д. А., Ягодкина Ю. А.* Программы архиваторы. Обзор основных характеристик и их сравнение // Современное состояние и пути развития науки XXI века: Сб. статей по итогам Междунар. научно-практ. конф. Стерлитамак, 2017. С. 178–181.

10. *Sapate S.* Effective XML Compressor: XMill with LZMA Data Compression // International Journal of Education and Management Engineering. 2019. Vol. 9. No 4. P. 1–10.

УДК 004.056, 004.415 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-51-54**

В. А. Мыльников*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПОИСКА УЯЗВИМОСТЕЙ В ИСХОДНОМ КОДЕ НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ

Рассматриваются вопросы поиска уязвимостей в программном коде на этапе его написания в компаниях-разработчиках программного обеспечения. Выделены основные виды уязвимостей и определены пути их устранения. Проведен анализ систем выявления рисков в компонентах программных приложений и статистических анализаторов.
Ключевые слова: *разработка программного обеспечения, информационная безопасность, автоматизация поиска уязвимостей.*

V. A. Myl'nikov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

AUTOMATION OF SEARCH FOR VULNERABILITIES IN SOURCE CODE AT THE STAGE OF SOFTWARE APPLICATION DEVELOPMENT

The issues of searching for vulnerabilities in the program code at the stage of its writing in software development companies are considered. The main types of vulnerabilities are identified and ways to eliminate them are identified. The analysis of risk detection systems in the components of software applications and statistical analyzers was carried out.
Keywords: *software development, information security, vulnerability search automation.*

Компании, занимающиеся разработкой программного обеспечения, в настоящее время часто используют готовые компоненты – библиотеки, фреймворки и др. С одной стороны, данный метод позволяет сократить время разработки, улучшить качество разрабатываемого продукта и снизить его стоимость; с другой – использование готовых решений может негативно сказаться на надежности и безопасности процессов разработки. Разработка с использованием открытых библиотек сопряжена с разного рода рисками, среди которых можно выделить:

– риски информационной безопасности: используемые компоненты могут содержать уязвимости различной степени критичности, позволяющие злоумышленнику реализовывать угрозы утечки информации;

– лицензионные риски: требования лицензии, используемой открытой библиотекой, могут противоречить принципам компании, например, требовать раскрытия исходного кода программного обеспечения;

– операционные риски: используемая версия компонента может быть устаревшей или неподдерживаемой.

Для минимизации рисков необходим постоянный мониторинг используемых при разработке компонентов, оценивание рисков работы с ними, а также своевременно обновлять применяемые библиотеки [1]. В связи с этим актуальной является задача разработки механизмов выявления и устранения уязвимостей в разрабатываемом программном продукте на стадиях написания программного кода или сборки. При этом должен одновременно производиться анализ на предмет наличия уязвимостей в заимствованных компонентах и ошибок, допущенных во время написания собственного кода.

Таким образом, по результатам проведенного анализа были определены следующие требования к внедряемой системе:

– автоматизированное выявление используемых компонентов с открытым исходным кодом;

– автоматизированный поиск известных уязвимостей в базах данных для всех выявленных компонентов;

– проведение статического анализа кода – сопоставление анализируемого кода с известными шаблонами допускаемых ошибок;

– отслеживание процесса сборки продукта для снижения количества ложноположительных срабатываний;

– обеспечение соответствия требованиям регуляторов по части безопасной разработки;

– обеспечение возможности встраивания решения в процесс непрерывной интеграции.

Рассмотрим этапы разработки программного обеспечения, где возможно возникновение угроз информационной безопасности при внедрении компонентов с открытым программным кодом. К ним относятся: внесение изменений в исходный код – непосредственная разработка, включающая порядок изменения и хранения исходных кодов; сборка продукта на сервере непрерывной интеграции; поиск известных уязвимостей в компонентах.

На этапе внесения изменений в исходный код существуют следующие проблемы:

– неопределенное поведение (*undefined behavior*) – поведение, которое может возникать в результате использования ошибочных программных конструкций или некорректных данных. Сейчас современные операционные системы принудительно останавливают работу программы, если обнаруживают в ее работе неопределенное поведение;

– ошибки при работе с памятью – все ошибки такого рода потенциально влекут за собой возможность для эксплуатации уязвимостей в разрабатываемом продукте. По данным Microsoft, 70 % уязвимостей их продуктов связаны с ошибками при работе с памятью [2];

– конфиденциальные данные, хранящиеся в открытом виде – часто при отладке или локальной сборке программы разработчики «временно» задают в коде секретные значения: учетные данные, токены доступа, сетевые адреса и т. д. или такие данные могут быть размещены в конфигурационных файлах. При фиксации изменений и отправке их в версионное хранилище кода эти значения попадают на сервер и могут быть просмотрены всеми, у кого есть доступ к репозиторию.

Для решения вышеперечисленных проблем на предприятиях внедряются следующие механизмы:

– работа с системой контроля версий по методологии GitFlow – разработчики автономно ведут работу в отдельных ветках, затем после прохождения процедуры рецензирования исходного кода изменения объединяются в основную ветку, что позволяет вероятность возникновения ошибок в коде будущего релиза продукта и переноса их на следующие стадии разработки;

– проведение рецензирования исходного кода – перед слиянием новых изменений из ветки разработчика в основную ветку код рецензируется отдельными участниками команды;

– внедрение статических анализаторов кода, позволяющих находить некоторые ошибки в среды разработки, таких как PVS Studio [3] и SonarQube [4].

Применяемые методы не являются высокоэффективными ни по времени, ни по затратам ресурсов, ни по качеству, так как они не позволяют исправлять ошибки в режиме реального времени, а представляют собой проверку выполненной работы по факту ее представления. Кроме того, результат их действия часто зависит от профессионализма рецензента, то есть является субъективным.

В процессе сборки программного обеспечения на сервере непрерывной интеграции существуют следующие уязвимости:

– доступ сборочных агентов в Интернет, что является непосредственной угрозой для информационной безопасности конечного продукта;

– уязвимости в сторонних библиотеках. По данным отчета Linux Foundation 2020 [5] 80–90 % современного программного обеспечения состоит из FOSS (*free/libre and open-source software* – свободное программное обеспечение с общедоступными (открытыми) исходными кодами), известно, что разработчики FOSS часто пренебрегают закрытием уязвимостей, отдавая предпочтение наращиванию функционала;

– нарушение правил лицензионного соглашения при использовании открытого исходного кода – поскольку разрабатываемое программное обеспечение является коммерческим продуктом, необходимо анализировать его на заимствование открытого исходного кода, распространяемого под такими лицензиями, как GNU Public License, обязывающими разработчиков поставлять код в открытом виде. Нарушение лицензионного соглашения может привести к убыткам в компании и проблемам при сертификации.

Для решения вышеперечисленных проблем на предприятиях внедряются следующие механизмы: назначение компетентных сотрудников для администрирования сборочной инфраструктуры; мониторинг сборочных серверов и агентов при помощи систем мониторинга; ограничение доступа в открытую сеть для сборочных агентов при помощи межсетевых экранов.

Информация о новых уязвимостях в FOSS-компонентах обновляется регулярно, ее поиск осуществляется вручную специалистами компании, которые проводят непрерывный мони-

Таблица 1

Сравнение информационных систем выявления рисков в компонентах

Критерий	Black Duck	Jfrog Xray	RedCheck
Анализ оборудования	–	–	+
Анализ конфигурационных файлов операционной системы	–	–	+
Анализ исходных кодов	+	–	–
Анализ бинарных файлов	+	+/– (только пакеты)	+
Анализ используемых в компании языков программирования	+	+/– (только пакеты)	+
Выявление лицензионных рисков	+	+	не указано
Возможность интеграции с CI-системой	–	+	–
Фоновый анализ пакетов	–	+	–
Поддержка менеджеров зависимостей	+	+	+
Необходимость доступа в Интернет	–	–	не указано
API	+/– (неудобный)	+	+
Необходимость работы с клиента	–	+	–
Ручной анализ списка компонентов	+	+	–
Собственная база уязвимостей	+	–	–
Использование базы угроз ФСТЭК	–	–	+
Падение сборки с анализом при обнаружении критических уязвимостей	+	+	не указано
Лицензирование	Один пользователь – одна лицензия	Один сервер – одна лицензия	Одна лицензия на каждый сервер и анализируемый хост

торинг открытых источники информации об угрозах и уязвимостях на предмет обнаружения новых дефектов в используемых в компании компонентах. После получения информации о том, что в используемом в продуктах компании компоненте содержится незакрытая уязвимость, специалист компании должен провести анализ применимости уязвимости в контексте использования компонента в продукте: используемые методы, среда исполнения, степень доверия пользователей, конфигурационные параметры и т. д. Такой мониторинг является чрезвычайно трудоемким и ненадежным, так как целиком основан на человеческом факторе. Кроме того, учитывая недостаток профессионального кадрового ресурса, компаниям нелегко найти специалистов по выявлению и устранению уязвимостей программных продуктов.

Существуют следующие программные продукты, позволяющие выполнять автоматизированный поиск рисков в компонентах с открытым исходным кодом: Synopsys Black Duck, АЛТЭКС-СОФТ RedCheck, Jfrog Xray. Сравнение данных продуктов по выделенным функциям представлено в табл. 1.

В результате можно сделать вывод, что наилучшим решением для проектируемой системы является Synopsys Black Duck, поскольку данный сервис способен анализировать различные типы файлов, распознавать большее в сравнении с Xray количество форматов конфигурационных файлов менеджеров зависимостей, а также нацелен на анализ конечных продуктов, что потенциально защищает компанию от аналогичных действий злоумышленников с целью выявить места атаки в целевых продуктах.

Для проведения статического анализа исходного кода продуктов к анализаторам предъявляются следующие требования: возможность анализа программного кода на используемом в компании языке программирования с поддержкой современных стандартов; возможность размещения серверных составляющих на внутренней инфраструктуре компании без использования облачных решений; соответствие анализатора описанным в ГОСТ [6] требованиям. В табл. 2 представлено сравнение существующих анализаторов.

По данным табл. 2 можно сделать вывод, что для прохождения программными продуктами сертификации во ФСТЭК наилучшими возможными решениями являются Svace или SonarQube для всех языков, не поддерживаемых Svace. А для прохождения сертификации в ФСБ наилучшие варианты – анализаторы PVS-Studio и Svace, так как они позволяют выполнить качественный анализ C/C++ кода, на котором реализуются в большинстве своем

Таблица 2

Сравнение статических анализаторов

Критерий	Svace	SonarQube	PVS-Studio	Scan-build	CppCheck
Отслеживание компилятора	+	+/– (C/C++, Java, Kotlin)	+	+	–
Анализ не C/C++	+	+	+	–	–
Хранение истории анализов в БД	+	+	+/– (через Sonar)	+/– (через Sonar)	+/– (через Sonar)
Уровень ложноположительных срабатываний	низкий	средний	низкий	средний	высокий
Интеграция с CI-системами	–	+	+	–	–
Веб-интерфейс для обработки	+	+	+/– (через Sonar)	+/– (через Sonar)	+/– (через Sonar)

криптографические модули. Если программный продукт не сертифицируется, Svace и PVS-Studio рекомендуются для анализа кода на C/C++, а SonarQube для анализа кода на других поддерживаемых языках.

Учитывая недостатки процесса ручного рецензирования программного кода и поиска уязвимостей в компонентах информационной системы, целесообразной является их автоматизация посредством внедрения статических анализаторов исходного кода и систему выявления рисков в FOSS-компонентах. Система выявления рисков в FOSS-компонентах – автоматизированная система, которая способна выявить используемые в программном обеспечении компоненты и получить информацию о различных типах рисков в них. Такие системы способны анализировать как исходный код программ, так и скомпилированные бинарные файлы. Для полноценного обеспечения информационной безопасности данные средства должны быть внедрены как единая информационная система.

Список источников

1. *Беззатеев С. В., Елина Т. Н., Мыльников В. А.* Методика оценки рисков информационных систем на основе анализа поведения пользователей и инцидентов информационной безопасности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. № 4. С. 553–561.

2. Дайджест «Оценка ущерба от утечек для пострадавших компаний за период 2019-2021 гг. (по материалам IBM и Ponemon Institute)» // Экспертно-аналитический центр ИнфоВотч. М., 2021. URL: https://www.infowatch.ru/analytics/daydzhesty-i-obzory/srednyaya-stoimost-uscherba-ot-utechek-dannykh (дата обращения 04.01.2023).

3. Официальная документация SonarQube. URL: https://www.sonarqube.org/ (дата обращения: 04.01.2023).

4. Официальная документация PVS-Studio. URL: https://pvs-studio.com/ru/pvs-studio/ (дата обращения: 04.01.2023).

5. Linux Foundation Annual Report 2020. URL: https://www.linuxfoundation.org/resources/publications/linux-foundation-annual-report-2020 (дата обращения: 04.01.2023).

6. ГОСТ Р 56939-2016. Национальный стандарт российской федерации. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200135525 (дата обращения: 04.01.2023).

УДК 004.056, 004.415 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-55-59**

В. А. Мыльников*
кандидат технических наук, доцент
Т. Н. Елина*
кандидат экономических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА УЯЗВИМОСТЕЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Предложена информационная система поиска уязвимостей в открытых программных кодах с целью их безопасного использования в процессе разработки программного обеспечения. Определены наиболее эффективные технологии создания системы и спроектирована ее клиент-серверная архитектура.
Ключевые слова: *проектирование информационных систем, разработка программного обеспечения, информационная безопасность, автоматизация поиска уязвимостей.*

V. A. Myl'nikov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
T. N. Yelina*
PhD Sc. Economic, Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DESIGNING THE ARCHITECTURE OF AN INFORMATION SYSTEM FOR MONITORING VULNERABILITIES IN SOFTWARE DEVELOPMENT

An information system for searching for vulnerabilities in open source codes is proposed for the purpose of their safe use in the software development process. The most effective technologies for creating the system are determined and its client-server architecture is designed.
Keywords: *information systems design, software development, information security, vulnerability search automation.*

При разработке информационных систем для ускорения, упрощения и унификации процесса написания программного кода компании-разработчики часто используют сторонний программный код из различных источников. Данный факт сопряжен с рисками информационной безопасности как для самого процесса разработки, так и для конечного продукта [1]. Для минимизации этих рисков необходим постоянный мониторинг используемых при разработке компонентов и оценивание рисков работы с ними, что достигается путем разработки автоматизированной информационной системы выявления и устранения уязвимостей в разрабатываемом программном продукте на стадиях написания программного кода. Система должна одновременно производить анализ на предмет наличия уязвимостей в заимствованных компонентах, а также ошибок, допущенных во время написания собственного программного кода.

Стек технологий, обеспечивающий основной функционал системы мониторинга уязвимостей при разработке программного обеспечения, можно спроектировать в следующем виде:

1) вычислительные технологии:

а) процессорные архитектуры;

б) x86_64 – поддерживается всеми компонентами системы;

2) операционные системы:

– Debian GNU/Linux 11 – корпоративный стандарт для серверов, новая версия которой содержит предустановленные новейшие пакеты, активно поддерживающиеся сообществом разработчиков программного обеспечения;

– Windows 10 – используется на предназначенных для сборки продуктов под ОС Windows сборочных агентах и большинстве рабочих станциях разработчиков;

3) технологии виртуализации:

VMware ESXi v6.7/v7.0 – предоставляет широкий функционал по настройке виртуальной инфраструктуры;

4) технологии контейнеризации и кластеризации:

– Docker – платформа для запуска контейнеров;

– Docker swarm – режим запуска контейнеров в кластере для повышения отказоустойчивости;

5) технологии хранения данных:

а) SQL СУБД:

PostgreSQL – поддерживается всеми компонентами системы, работающими с SQL, надежная и бесплатная СУБД.

б) NoSQL СУБД:

MongoDB – используется для хранения отчетов в утвержденной регламентом форме, эта СУБД проста в использовании и администрировании.

6) CI-системы:

JetBrains TeamCity –система непрерывной интеграции.

7) Языки программирования:

а) языки разработки библиотек:

– Python 3.9 – совместима с другими сервисами и утилитами, предоставляет возможность использования модулей, написанных разработчиками Black Duck;

– Go 1.17.2 – совместима с другими сервисами и утилитами, предоставляет возможность использования модулей, написанных разработчиками Black Duck;

б) языки разработки сервисов:

– Python 3.9 – совместима с другими сервисами и утилитами, быстро реализовывать новые требования;

– Go 1.17.2 – обеспечивает более высокую производительность по сравнению с Python, поддерживает программные интерфейсы Prometheus, Grafana, Docker и Kubernetes;

в) Сторонние библиотеки:

– FastAPI – фреймворк для разработки RESTful API на Python;

– Pytest – разработка модульных и интеграционных тестов;

– requests – модуль Python для работы с http запросами;

– hub-restapi-python – библиотека для работы с API Black Duck на Python;

– hub-restapi-golang – библиотека для работы с API Black Duck на Go;

– XlsxWriter – библиотека для работы с документами Excel;

– SQLAlchemy – библиотека на Python для работы с реляционными СУБД с применением технологии ORM;

г) инструменты для описания архитектуры:

Atlassian Confluence – сервис для работы с документацией;

д) инструменты разработки общего назначения:

– PyCharm – среда разработки на Python;

– GoLand – среда разработки на Go;

– VS Code – удобный текстовый редактор с поддержкой множества форматов файлов;

е) инструменты контроля полноты покрытия кода модульными тестами:

– Coverage – утилита для проверки покрытия тестами кода на Python. Генерирует отчеты, которые могут быть отображены в SonarQube;

– Go test – стандартное средство для проверки покрытия тестами кода на Go;

ж) системы рецензирования кода:

TFS Pull request – система проведения рецензирования изменений в коде;

1) инструменты безопасной разработки:

а) статические анализаторы исходного кода:

– CppCheck – наиболее простой в использовании, но и наименее функциональный анализатор, однако он принимается испытательными лабораториями;

– Scan-build – поставляется вместе с компилятором clang, использующимся для разработки под ОС Apple. Не разделяет предупреждения по уровню критичности, но встраивается в IDE и является стандартом де-факто для программного обеспечения под ОС Apple;

– PVS-Studio – рекомендованный анализатор для сертифицирующихся во ФСТЭК продуктов, позволяет проводить все стадии анализа на всех сборочных агентах;

– Svace – единственный анализатор, удовлетворяющий всем требованиям ФСТЭК: ранжирует предупреждения по уровням критичности в соответствии с ГОСТ, хранит историю анализов в базе данных, проходит наибольшее количество тестов испытательных лабораторий. Требует аппаратного ключа, больших вычислительных ресурсов и занимает большое количество времени во время анализа. Отчет, который генерирует веб-интерфейс, не информативен, так как содержит только статистические данные;

– SonarQube – предоставляет удобный веб-интерфейс для обработки предупреждений, анализ множества языков, загрузку отчетов других анализаторов, написание расширений (плагинов), благодаря которым возможно добавить поддержку дополнительных языков и прочих средств. Все это делает его рекомендуемым средством для централизованной обработки предупреждений;

з) системы выявления рисков в компонентах с открытым исходным кодом:

Black Duck – по результатам предварительно проведенного анализа определена, как наилучшее решение.

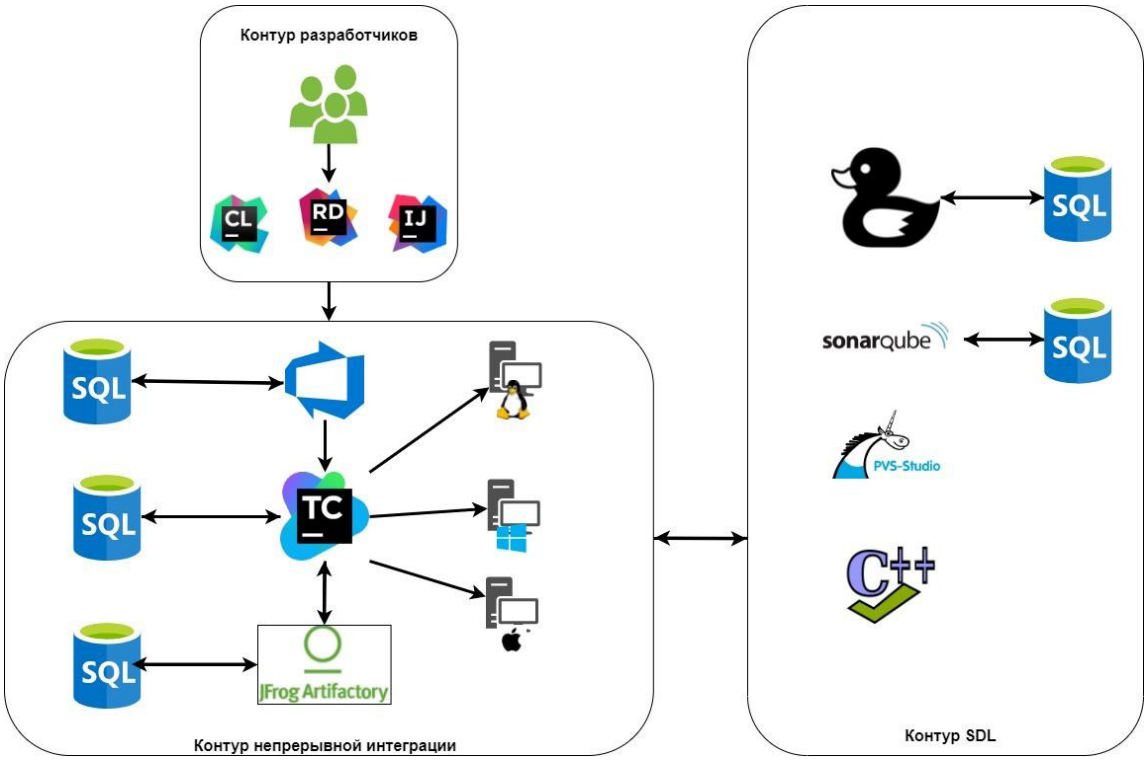


Рис. 1. Архитектуры информационной системы

Архитектура системы мониторинга и поиска уязвимостей в программном коде, реализующая описанный стек технологий, представлена на рис. 1.

Для автоматизации формирования отчетов в регламентном формате система содержит сервисы, преобразующие стандартные отчеты статических анализаторов или при необходимости создающие регламентные отчеты по данным из систем для проведения анализа. Поскольку важным условием внедрения разработанной системы является возможность ее использования в контуре непрерывной интеграции, оба сервиса имеют клиент-серверную архитектуру без графического интерфейса. Клиентские приложения представляют из себя консольные утилиты, с которыми взаимодействуют пользователи. Серверное приложение получает всю необходимую информацию из баз данных анализаторов и реализуют логику создания, заполнения и отправки клиенту Excel-документов. Работа с сервисом по созданию регламентных отчетов Black Duck представляет из себя выполнение GET-запросов к серверу. Сервер получает в качестве параметров запроса название проекта и название версии проекта Black Duck и возвращает клиенту Excel-документ. Такой подход позволяет создать типовую сборочную конфигурацию, которую просто настроить и использовать в цепочке сборок. На рис. 2 показан пример настройки шага сборки для создания отчетов. На рис. 3 представлен пример созданного в результате регламентного отчета.

Сервис по конвертации отчетов статических анализаторов в регламентную форму состоит из консольного клиента, распространяемого и используемого как pip-модуль, и сервера, реализующего всю внутреннюю логику. Сервис поддерживает следующие форматы отчетов анализаторов: CppCheck – xml; Scan-build – plist; PVS-Studio – csv для Linux; plog для Windows; Svace – svres; SonarQube – xls.

На рис. 4 показан пример регламентного отчета по статическому анализу, в нем присутствуют два столбца с уровнем критичности предупреждений – «Класс предупреждений компании» и «Класс предупреждений из отчета». Значения для второго столбца получены из отчета анализатора в соответствии с его собственной системой определения критичности. Значение в столбце «Класс предупреждений компании» получается из сопоставления предупреждений анализаторов критериям к уровням критичности ГОСТ [2].

В результате внедрения в бизнес-процессы разработки программного обеспечения представленной информационной системы вероятность допущения критических ошибок разра-

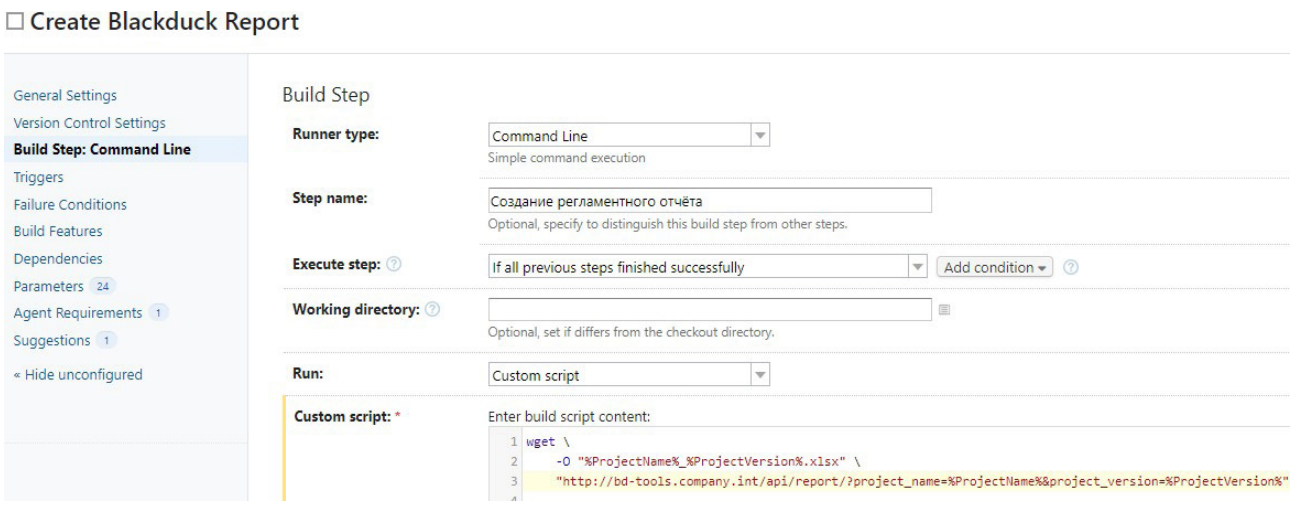
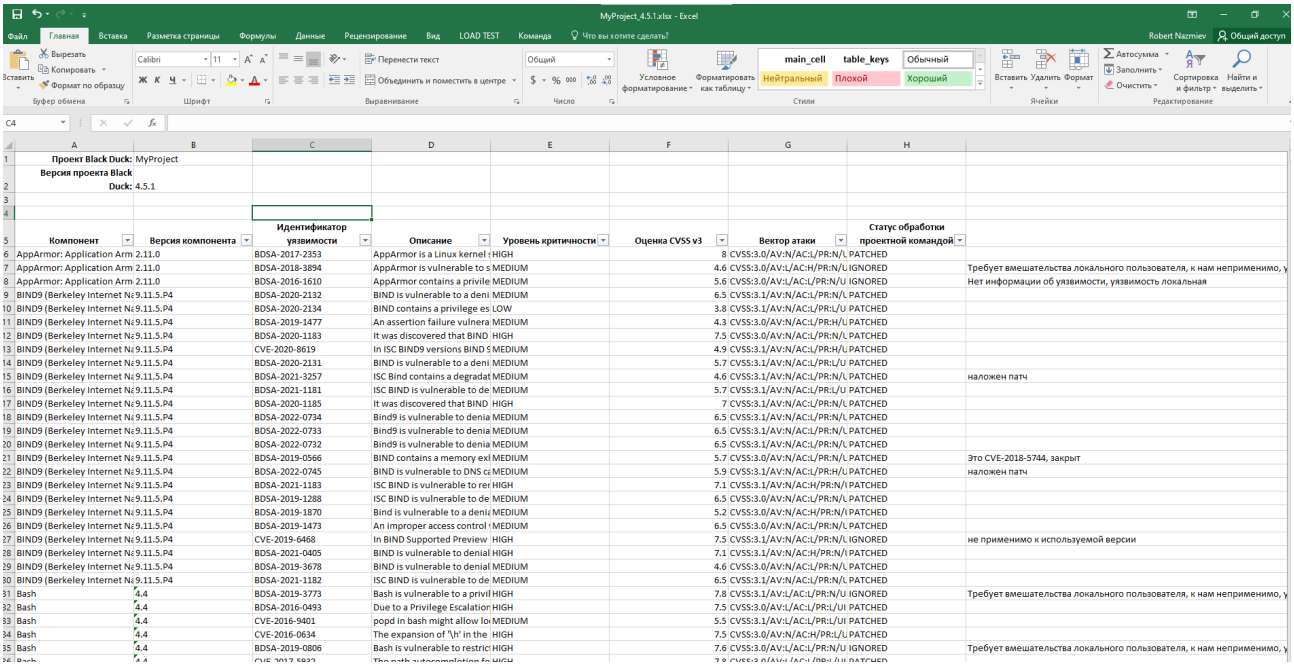
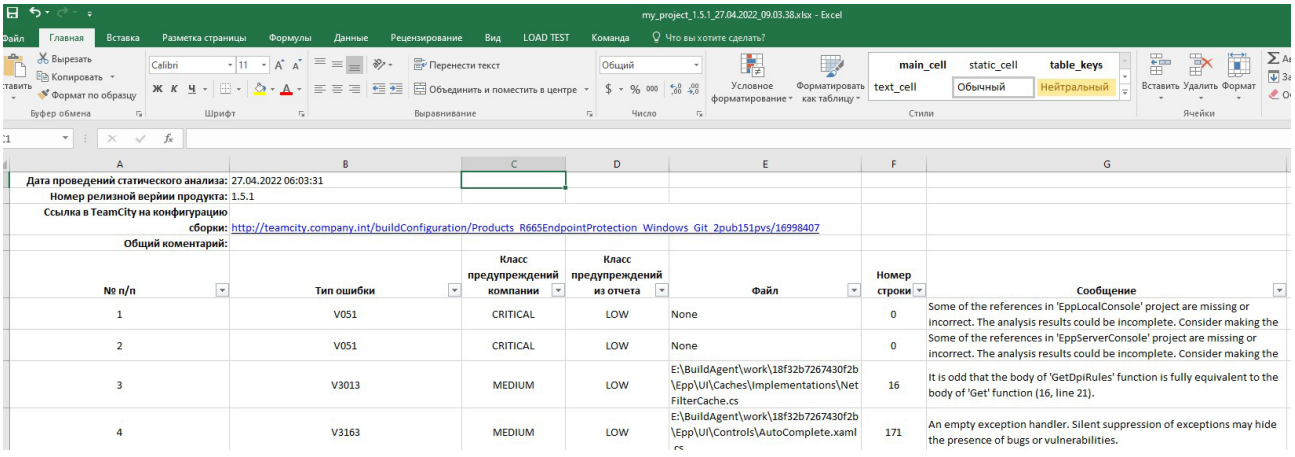


Рис. 2. Настройка параметров сборки для создания регламентного отчета Black Duck



Проект Black Duck: MyProject								
Версия проекта Black Duck: 4.5.1								
Компонент	Версия компонента	Идентификатор уязвимости	Описание	Уровень критичности	Оценка CVSS v3	Вектор атаки	Статус обработки проектной командой	
AppArmor: Application Arm	2.11.0	BDSA-2017-2353	AppArmor is a Linux kernel	HIGH	8	CVSS:3.0/AV:N/AC:L/PR:N/U	PATCHED	
AppArmor: Application Arm	2.11.0	BDSA-2018-3894	AppArmor is vulnerable to s	MEDIUM	4.6	CVSS:3.0/AV:L/AC:H/PR:N/U	IGNORED	Требует вмешательства локального пользователя, к нам неприменимо, у
AppArmor: Application Arm	2.11.0	BDSA-2016-1610	AppArmor contains a privile	MEDIUM	5.6	CVSS:3.0/AV:L/AC:L/PR:N/U	IGNORED	Нет информации об уязвимости, уязвимость локальная
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2020-2132	BIND is vulnerable to a deni	MEDIUM	6.5	CVSS:3.1/AV:N/AC:L/PR:N/U	PATCHED	
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2020-2134	BIND contains a privilege es	LOW	3.8	CVSS:3.1/AV:N/AC:L/PR:L/U	PATCHED	
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2019-1477	An assertion failure vulnera	MEDIUM	4.3	CVSS:3.0/AV:N/AC:L/PR:N/U	PATCHED	
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2020-1183	It was discovered that BIND	HIGH	7.5	CVSS:3.0/AV:N/AC:L/PR:N/U	PATCHED	
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	CVE-2020-8619	In ISC BIND9 versions BIND 9	MEDIUM	4.9	CVSS:3.1/AV:N/AC:L/PR:H/U	PATCHED	
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2020-2131	BIND is vulnerable to a deni	MEDIUM	5.7	CVSS:3.1/AV:N/AC:L/PR:L/U	PATCHED	
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2021-3257	ISC Bind contains a degradat	MEDIUM	4.6	CVSS:3.1/AV:N/AC:L/PR:N/U	PATCHED	наложен патч
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2021-1181	ISC BIND is vulnerable to de	MEDIUM	5.7	CVSS:3.1/AV:N/AC:L/PR:L/U	PATCHED	
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2020-1185	It was discovered that BIND	HIGH	7	CVSS:3.1/AV:N/AC:L/PR:N/U	PATCHED	
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2022-0734	Bind9 is vulnerable to denia	MEDIUM	6.5	CVSS:3.1/AV:N/AC:L/PR:N/U	PATCHED	
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2022-0733	Bind9 is vulnerable to denia	MEDIUM	6.5	CVSS:3.1/AV:N/AC:L/PR:N/U	PATCHED	
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2022-0732	Bind9 is vulnerable to denia	MEDIUM	6.5	CVSS:3.1/AV:N/AC:L/PR:N/U	PATCHED	
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2019-0566	BIND contains a memory exl	MEDIUM	5.7	CVSS:3.0/AV:N/AC:L/PR:N/U	PATCHED	Это CVE-2018-5744, закрыт
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2022-0745	BIND is vulnerable to DNS ca	MEDIUM	5.9	CVSS:3.1/AV:N/AC:H/PR:N/U	PATCHED	наложен патч
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2021-1183	ISC BIND is vulnerable to rer	HIGH	7.1	CVSS:3.1/AV:N/AC:H/PR:N/U	PATCHED	
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2019-1288	ISC BIND is vulnerable to de	MEDIUM	6.5	CVSS:3.0/AV:N/AC:L/PR:N/U	PATCHED	
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2019-1870	Bind is vulnerable to a denia	MEDIUM	5.2	CVSS:3.0/AV:N/AC:H/PR:N/U	PATCHED	
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2019-1473	An improper access control	MEDIUM	6.5	CVSS:3.0/AV:N/AC:L/PR:N/U	PATCHED	
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	CVE-2019-6468	In BIND Supported Preview	HIGH	7.5	CVSS:3.1/AV:N/AC:L/PR:N/U	IGNORED	не применимо к используемой версии
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2021-0405	BIND is vulnerable to denial	HIGH	7.1	CVSS:3.1/AV:N/AC:H/PR:N/U	PATCHED	
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2019-3678	BIND is vulnerable to denial	MEDIUM	4.6	CVSS:3.0/AV:N/AC:L/PR:N/U	PATCHED	
BIND9 (Berkeley Internet Na	9.11.5.P4	BDSA-2021-1182	ISC BIND is vulnerable to de	MEDIUM	6.5	CVSS:3.1/AV:N/AC:L/PR:N/U	PATCHED	
Bash	4.4	BDSA-2019-3773	Bash is vulnerable to a privil	HIGH	7.8	CVSS:3.1/AV:L/AC:L/PR:N/U	IGNORED	Требует вмешательства локального пользователя, к нам неприменимо, у
Bash	4.4	BDSA-2016-0493	Due to a Privilege Escalation	HIGH	7.5	CVSS:3.0/AV:L/AC:L/PR:L/UI	PATCHED	
Bash	4.4	CVE-2016-9401	popd in bash might allow lo	MEDIUM	5.5	CVSS:3.1/AV:L/AC:L/PR:L/UI	PATCHED	
Bash	4.4	CVE-2016-0634	The expansion of '\h' in the	HIGH	7.5	CVSS:3.0/AV:N/AC:H/PR:L/U	PATCHED	
Bash	4.4	BDSA-2019-0806	Bash is vulnerable to restric	HIGH	7.6	CVSS:3.0/AV:L/AC:L/PR:N/U	IGNORED	Требует вмешательства локального пользователя, к нам неприменимо, у

Рис. 3. Пример созданного сервисом регламентного отчета Black Duck



Дата проведений статического анализа:	27.04.2022 06:03:31					
Номер релизной верйии продукта:	1.5.1					
Ссылка в TeamCity на конфигурацию сборки:	http://teamcity.company.int/buildConfiguration/Products_R665EndpointProtection_Windows_Git_2pub151pvs/16998407					
Общий коментарий:						
№ п/п	Тип ошибки	Класс предупреждений компании	Класс предупреждений из отчета	Файл	Номер строки	Сообщение
1	V051	CRITICAL	LOW	None	0	Some of the references in 'EppLocalConsole' project are missing or incorrect. The analysis results could be incomplete. Consider making the
2	V051	CRITICAL	LOW	None	0	Some of the references in 'EppServerConsole' project are missing or incorrect. The analysis results could be incomplete. Consider making the
3	V3013	MEDIUM	LOW	E:\BuildAgent\work\18f32b7267430f2b\Epp\UI\Caches\Implementations\NetFilterCache.cs	16	It is odd that the body of 'GetDpiRules' function is fully equivalent to the body of 'Get' function (16, line 21).
4	V3163	MEDIUM	LOW	E:\BuildAgent\work\18f32b7267430f2b\Epp\UI\Controls\AutoComplete.xaml.cs	171	An empty exception handler. Silent suppression of exceptions may hide the presence of bugs or vulnerabilities.

Рис. 4. Пример регламентного отчета по статическому анализу

ботчиками значительно снизится за счет обнаружения уязвимостей в выявленных компонентах с открытым исходным кодом. Разработанные средства автоматизации позволят коллективам разработчиков с минимальными затратами труда повысить надежность и безопасность цикла разработки программного обеспечения.

Список источников

1. *Мыльников В. А., Елина Т. Н.* Анализ причин нарушения устойчивости облачных систем с учетом требований надежности и оперативности // Завалишинские чтения '18: сб. докладов. СПб.: ГУАП, 2018. С. 258–261.

2. ГОСТ Р 56939-2016. Национальный стандарт российской федерации. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200135525 (дата обращения: 04.01.2023).

УДК 004.056.55 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-60-64**

А. А. Потапов*
магистрант
А. В. Афанасьева*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ, ВНЕДРЕННЫХ В ОБЛАСТЬ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Рассмотрены методы внедрения информации в изображения, основанные на вейвлет-преобразовании. Данное преобразование, за счет своих свойств, получило широкое распространение в стеганографических системах в качестве области внедрения. В качестве примера использования данного преобразования в работе выбран алгоритм, представленный в [2], как наиболее типичный. В ходе экспериментов были подобраны наилучшие параметры системы при допустимой потере качества и изучены свойства полученной стегосистемы.
Ключевые слова: *стеганография, цифровые водяные знаки, дискретное вейвлет-преобразование, цифровые изображения.*

A. A. Potapov*
Postgraduate Student
A. V. Afanasyeva*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

INVESTIGATION OF THE PERSISTENCE OF THE INTRODUCTION OF DIGITAL WATERMARKS INTO IMAGES DURING WAVELET TRANSFORMATION

In this paper, methods of embedding information into images based on the wavelet transform is considered. This transformation, due to its properties, is widely used in various steganographic methods. The algorithm presented in [2] is chosen as the most typical for investigation in this paper. During the experiments, the best system parameters were selected with an acceptable loss of quality and the properties of the resulting stegosystem were studied.
Keywords: *steganography, digital watermarks, discrete wavelet transform, digital images.*

Введение

Аутентификация изображений необходима для защиты авторских прав и предотвращения фальсификации данных. В качестве решения этих задач наибольшее применение нашли методы стеганографии, которые являются эффективным средством сокрытия информации. Они позволяют обеспечивать защиту данных за счет внедрения в цифровые объекты цифровых водяных знаков и идентификационных меток.

Довольно широко распространены методы и исследования в области внедрения информации в цифровые изображения для обеспечения их защиты. В качестве внедряемой информации как правило используются текстовые данные – имя автора, название компании или другие изображения, например, логотип компании. Существует множество подходов к сокрытию цифровых водяных знаков в мультимедиа данные.

Цифровые водяные знаки

Цифровую стеганографию разделяют на следующие направления:

– встраивание информации с целью ее скрытой передачи;

– встраивание цифровых водяных знаков (ЦВЗ);

– встраивание идентификационных меток;

– встраивание заголовков.

Первое направление предполагает использование стегосистем для сохранения в секрете факта передачи цифровых данных [1].

ЦВЗ же, как правило, используются для защиты авторских прав, то есть для защиты от копирования и несанкционированного использования. Они делятся на три типа:

– хрупкие – ЦВЗ, разрушающиеся при небольшой модификации. Они применяются для контроля целостности и отличаются от цифро-

вой подписи тем, что позволяют вносить незначительные изменения, что важно для мультимедийных данных, а также способностью сохранять информацию о виде и местоположении примененного воздействия;

– полухрупкие – водяные знаки, устойчивые к одним преобразованиям, но неустойчивые к другим. Позволяют определить множество разрешенных преобразований над защищаемыми изображениями;

– стойкие – ЦВЗ, устойчивые к как можно более широкому спектру методов обработки и преобразования изображений.

Также методы внедрения ЦВЗ можно классифицировать по информации, необходимой для извлечения [1]:

– неслепые схемы: для извлечения необходимо и исходное изображение-контейнер, и оригинальный ЦВЗ;

– полуслепые схемы: оригинальный ЦВЗ;

– слепые схемы: не требуют дополнительной информации.

Встраивание идентификационных меток имеет ту же цель, что и ЦВЗ. Отличие состоит в том, что каждая копия защищаемой информации имеет свой уникальный идентификатор, который в случае нарушения авторских прав помогает установить виновного в этом покупателя данной информационной продукции.

При извлечении скрытого сообщения возможно два вида ошибок:

– можно не обнаружить присутствующего скрытого сообщения;

– ошибочное обнаружение скрытого сообщения в пустом контейнере.

Атаки на цифровые водяные знаки

Все атаки на стегосистемы можно разделить на активные и пассивные. Целью пассивных атак является раскрытие факта передачи секретного сообщения, а также возможное его извлечение. Активные же атаки предполагают удаление скрытой информации из контейнера или внедрение нелегального сообщения.

ЦВЗ является направлением стеганографии, в котором возможность нарушителя намеренно обнаружить метку не играет большую роль, и свойство необнаружимости должно выполняться по большей части для минимального визуального искажения контейнера. При этом возможности удаления или даже создания нелегального ЦВЗ злоумышленником критичны, так как основной задачей их внедрения является защита данных. Таким образом, все ЦВЗ, помимо хрупких, для выполнения основной цели должны обладать хорошей устойчивостью к различным преобразованиям над изображениями, то есть к активным атакам. При этом это могут быть как повседневные операции, которые могут производить легальные пользователи, так и преобразования, производимые нарушителем.

Активные атаки можно разделить на атаки искажения, фильтрации изображения и геометрические. Примерами таких атак являются: добавление различных видов шумов, перестановка и замена пикселей, сжатие изображений, обрезка, вращение, изменение размера изображения, изменение формы путем сдвига, масштабирования и т. д. [3].

Дискретное вейвлет-преобразование

Дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) представляет собой вейвлет-преобразование, выполняемое над дискретными отсчетами сигнала. Само вейвлет-преобразование является сверткой сигнала с вейвлет-функцией или вейвлетом и позволяет перейти из временного представления сигнала к частотно-временному. Данное преобразование используется для сжатия в стандарте JPEG2000. В зависимости от режима сжатия в стандарте используются вейвлеты CDF-5/3 (сжатие без потерь) или CDF-9/7 (сжатие с потерями).

Для изображений применяется двухмерное преобразование путем применения обычного ДВП последовательно к строкам, а затем к столбцам. В результате изображение разбивается на 4 подблока, один низкочастотный (LL), 2 среднечастотных подблока (HL, LH) и 1 высокочастотный (HH). Над ними в свою очередь также можно произвести следующий уровень преобразования.

Дискретное вейвлет-преобразование является довольно распространенным инструментом. в стеганографии и используется во многих методах внедрения ЦВЗ. ДВП содержит как частотные, так и пространственные характеристики, что дает возможность более эффективно учитывать особенности зрительной системы человека. Кроме того, ДВП помогает повысить невидимость и надежность в сочетании с другими алгоритмами. В [4] говорится, что вейвлеты имеют большие преимущества в представлении локальных особенностей функций и учете особенностей психофизиологической модели восприятия. Кроме того, их применением при разработке метода стеганографии, можно решить основные задачи стеганографии, а именно: минимизация вносимых искажений и устой-

чивость к атакам злоумышленника. Для повышения надежности в различных методах используются гибридные схемы встраивания, состоящие из нескольких преобразований. Например, одними из наиболее часто используемых гибридных схем являются схемы, использующие сингулярное преобразование.

Исследуемый алгоритм внедрения

Для реализации был выбран алгоритм, представленный в [2]. За счет внедрения во все частотные поддиапазоны предложенный метод имеет высокую устойчивость к атакам, с его помощью проще анализировать результаты внедрения в различные частотные области вейвлет-преобразования. В исходной статье утверждается, что встраивание визуального водяного знака как на низких, так и на высоких частотах позволяет создать надежный метод, который может противостоять различным видам атак.

Алгоритм внедрения цифрового водяного знака

Декомпозиция изображения контейнера на четыре поддиапазона: LL, HL, LH, HH, с помощью двумерного ДВП.

Применение сингулярного преобразования (СП) для каждого из поддиапазонов:

$$A^k = U_a^k S_a^k V_a^{kT},\ k = 1,2,3,4,$$

где k – поддиапазоны LL, HL, LH, HH. При этом $\lambda_i^k, i = 1,...,n$ – сингулярные значения матрицы S_a^k.

Применение СП для изображения ЦВЗ: $W = U_W S_W V_W^T, \lambda_{wi}, i = 1,...,n$ – сингулярные значения матрицы S_W.

Внедрение ЦВЗ путем модификации сингулярных значений контейнера

$$\lambda_i^{*k} = \lambda_i^k + \alpha\lambda_{wi},\ i = 1,...,n,\ k = 1,2,3,4. \quad (1)$$

Получение четырех поддиапазонов коэффициентов ДВП:

$$A^{*k} = U_a^k S_a^* V_a^{kT},\ k = 1,2,3,4. \quad (2)$$

Применение обратного двумерного ДВП на модифицированных поддиапазонах для получения изображения контейнера с внедренным ЦВЗ.

Алгоритм извлечения цифрового водяного знака

Декомпозиция заполненного контейнера на четыре поддиапазона: LL, HL, LH, HH, с помощью двумерного ДВП.

Применение СП для каждого из поддиапазонов: $A^k = U_a^k S_a^k V_a^{kT}$, $k = 1,2,3,4$, где k обозначает поддиапазоны LL, HL, LH, HH. При этом $\lambda_i^k, i = 1,...,n$ – сингулярные значения матрицы.

Извлечение сингулярных значений из каждого поддиапазона:

$$\lambda_{wi}^{*k} = (\lambda_i^{*k} - \lambda_i^k)/\alpha,\ i = 1,...,n,\ k = 1,2,3,4. \quad (3)$$

Получение четырех изображений ЦВЗ, используя извлеченные сингулярные значения:

$$W^k = U_W S_W^k V_W^T,\ k = 1,2,3,4. \quad (4)$$

Анализ стойкости процедуры внедрения ЦВЗ

Для анализа устойчивости реализованного алгоритма внедрения ЦВЗ и ее количественной оценки будет использована оценка нормированного коэффициента корреляции NC (*normalized correlation*), рассчитанная для извлеченных водяных знаков после различных активных атак на заполненный контейнер. Считается, что приемлемое значение коэффициента корреляции не должно быть ниже 0,75. Коэффициент рассчитывается следующим образом:

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{W}(A_{i,j}^{(A)} - \overline{A}_{i,j}^{(A)})(\overline{B}_{i,j}^{(A)} - \overline{A}_{i,j}^{(A)})}{\left(\sqrt{\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{W}(A_{i,j}^{(A)} - \overline{A}_{i,j}^{(A)})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{W}(B_{i,j}^{(A)} - \overline{B}_{i,j}^{(A)})^2}\right)}. \quad (5)$$

В данном разделе производится анализ свойств реализованной стегосистемы. Для всех экспериментов в качестве контейнеров использовался набор из 100 изображений в градациях серого в формате .bmp разрешением 512 × 512. Некоторые из них представлены на рис. 1.

В качестве ЦВЗ использовалось изображение «peppers.bmp» разрешением в 256 × 256, представленное на рис. 2.

В качестве результата анализа стойкости были сформированы таблицы, со значениями оценок математического ожидания M (6), дисперсии σ^2 (7) и медианой Me значений NC, рассчитанных по выборке изображений для 4 извлекаемых ЦВЗ и различных параметрах атак

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{n} NC}{n}, \quad (6)$$

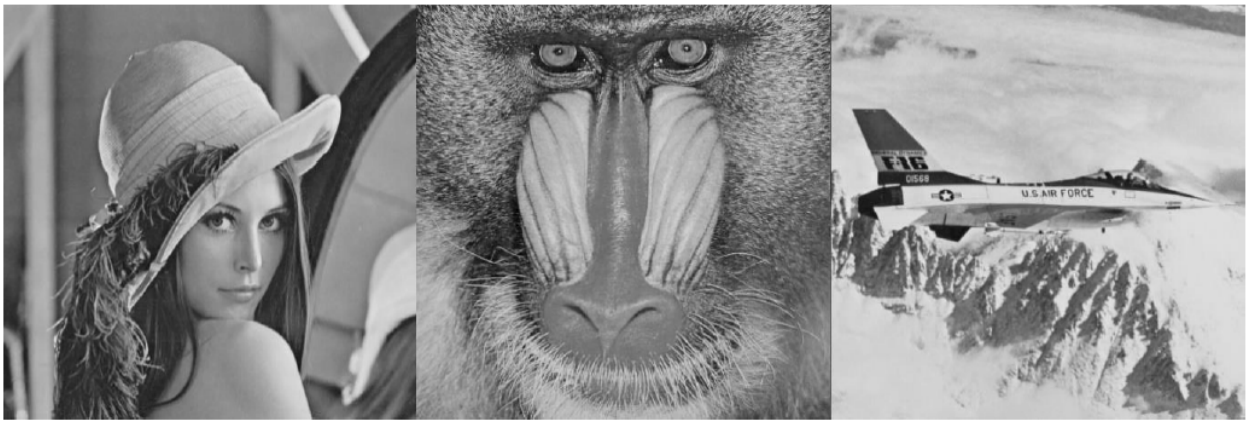


Рис. 1. Примеры тестовых контейнеров

Рис. 2. Используемый в экспериментах ЦВЗ

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(M - NC_i)^2}{n-1}. \qquad (7)$$

В качестве медианы *Me* принималось значение из середины отсортированного массива значений NC.

Результаты воздействия атак искажения представлены на рис. 3.

Реализованная система показала неплохую стойкость внедрения против атак искажения изображений. Во всех проведенных экспериментах для данной группы атак стойкость обеспечивало внедрение в низкочастотный поддиапазон LL.

Результаты воздействия атак улучшения качества представлены на рис. 4.

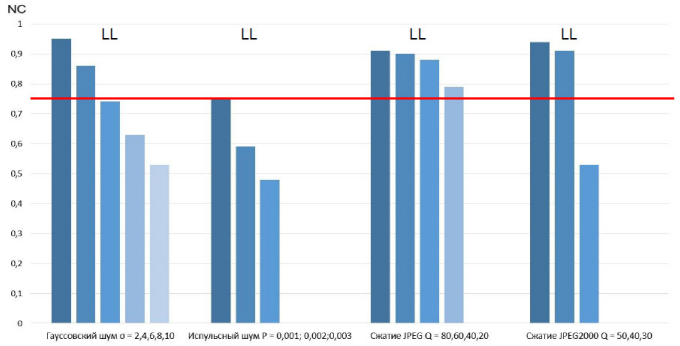


Рис. 3. Результаты атак искажения

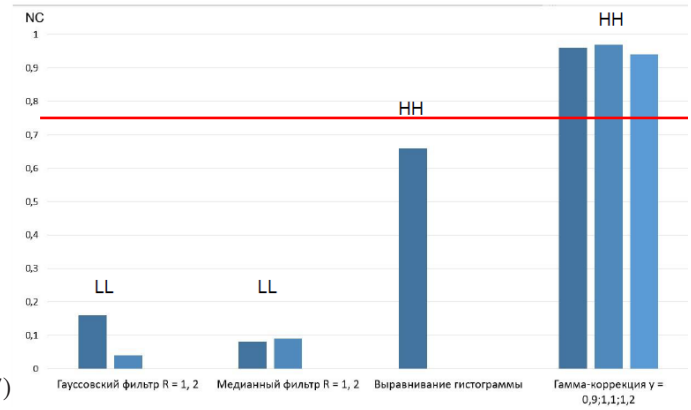


Рис. 4. Результаты атак улучшения качества

Внедренные ЦВЗ обладают довольно низкой стойкостью к атакам фильтрации. Довольно большой устойчивостью система обладает только по отношению к атаке гамма-коррекции. При разрушении изображения, внедренного в поддиапазон LL, остальные три изображения извлекаются в очень хорошем качестве.

Результаты воздействия геометрических атак представлены на рис. 5.

Как видно из диаграмм, ЦВЗ обладают средней устойчивостью к геометрическим атакам.

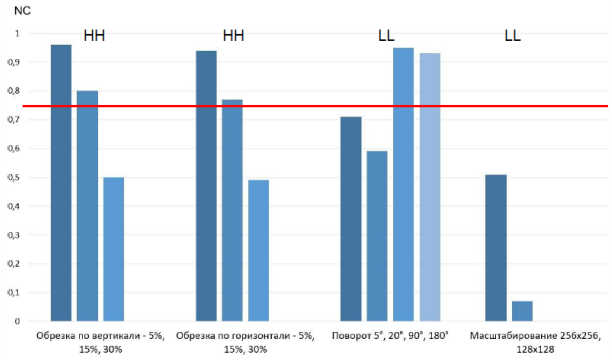


Рис. 5. Результаты геометрических атак

Заключение

Данная работа была посвящена анализу устойчивости процедуры внедрения ЦВЗ в цифровые изображения с использованием вейвлет-преобразования при помощи созданного программного комплекса.

Была произведена оценка показателей стойкости. Для этого в тестовую выборку изображений был внедрен ЦВЗ с максимальным значением коэффициента внедрения, обеспечивающий наибольшую стойкость с сохранением приемлемого качества изображения-контейнера, то есть оценка PSNR для данного внедрения принимает значения не ниже 37 дБ. К полученным заполненным контейнерам были применены атаки искажения, фильтрации, а также геометрические атаки. При этом большинство применяемых атак понижали качество заполненных контейнеров не более чем на 10 дБ, не считая геометрических атак. Затем проводилась процедура извлечения, и для каждого из полученных изображений и оригинального ЦВЗ рассчитывалась оценка NC, а также проводилось их визуальное сравнение. Наиболее устойчивым к атакам оказалось внедрение в низкочастотный (LL) и высокочастотный (HH) поддиапазоны. Изображения, извлеченные из низкочастотного поддиапазона, обладают наибольшими показателями стойкости к большинству проведенных атак, кроме гамма-коррекции, выравнивания гистограммы, обрезки. Данные атаки приводят к практически полному разрушению внедренного в данный поддиапазон ЦВЗ. Однако к данным атакам довольно устойчиво внедрение в высокочастотных поддиапазон. Реализованная система обладает довольно низкой устойчивостью к атакам улучшения качества, кроме гамма-коррекции. В целом реализованный метод довольно устойчив к большинству типов атак за счет внедрения во все поддиапазоны вейвлет-преобразования.

Список источников

1. *Грибунин В. Г., Оков И. Н., Туринцев И. В.* Цифровая стеганография. М.: Солон-Пресс, 2020. 272 с.

2. *Ganic E., Eskicioglu A.* Robust DWT-SVD domain image watermarking: embedding data in all frequencies. Proceedings of the 6th workshop on Multimedia & Security, MM&Sec 2004, Magdeburg, Germany, 2004. P. 166–174.

3. *Hosam O.* Attacking Image Watermarking and Steganography – A Survey // International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS), 2019. Vol. 11. N 3. P. 23–37.

4. *Севостьян Д. М., Юденков В. С.* Применимость вейвлет-преобразований в стеганографии // Труды БГТУ. Серия 4: Принт- и медиатехнологии. 2008. № 9. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenimost-veyvlet-preobrazovaniy-v-steganografii (дата обращения: 21.05.2021).

УДК 004.056.055 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-65-67**

В. А. Рындюк*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ АУДИТА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ БАНКОВСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрены подходы к построению нечеткой модели оценки уровня соответствия ИБ стандартам банковской системы РФ с учетом качественно определенных параметров. Проблема рассмотрена в приложении к изучению дисциплины «Основы информационной безопасности» для бакалавров направления 10.03.01 «Информационная безопасность».
Ключевые слова: *экспертиза информационной безопасности, нечеткая логика, стандарты банковской системы, модель оценки.*

V. A. Ryndyuk*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

IMPROVING THE INFORMATION SECURITY AUDIT PROCEDURE BANKING SYSTEM

Approaches to the construction of a fuzzy model for assessing the level of compliance of information security with the standards of the banking system of the Russian Federation are considered, taking into account qualitatively defined parameters. The problem is considered in the annex to the study of the discipline «Fundamentals of information security» for bachelors of direction 10.03.01 «Information security».
Keywords: *information security expertise, fuzzy logic, banking system standards, evaluation model.*

Экспертиза информационной безопасности (ИБ) является важнейшим средством подтверждения защищенности информационных систем организации (предприятия) как небольшой фирмы, так и специализированных государственных организаций и учреждений.

Ее успешное прохождение является гарантом защиты от современных угроз ИБ.

Безопасность банковской системы РФ – это ее защищенность от различного рода внешних и внутренних угроз, позволяющая надежно сохранить и эффективно использовать финансовый, материальный и кадровый потенциал, защитить процессы передачи конфиденциальной информации на расстояния.

Для подтверждения уверенности в защищенности банковской системы проводят оценку защищенности информации в информационных системах. Она выполняется согласно специализированным стандартам банковской системы (БС) РФ [1]–[3], главный из них – СТО БР ИББС-1.0-2014 «Обеспечение информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации. Общие положения».

В стандарте СТО БР ИББС-1.2-2014 [2] (далее – Методика) описана подробная методика оценки соответствия ИБ организаций БС РФ требованиям стандарта СТО БР ИББС-1.0-2014.

Отметим, что согласно стандарту СТО БР ИББС-1.1-2007 «Обеспечение информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации. Аудит информационной безопасности» [3] при оценке учитывают, кроме прочего, свидетельства, полученные в устной форме. Это в свою очередь вносит элементы неопределенности, которые могут отразиться на адекватности сделанного заключения по аудиту ИБ банка.

Наличие неопределенностей, а также существенное влияние человеческого фактора при применении этих стандартов усложняет работу экспертов и приводит к понимаю того, что нужна разработка новых методик, позволяющих решать такие задачи. Поэтому создание методики проведения экспертизы ИБ в банковской сфере с учетом качественно определенных параметров является актуальной научной задачей.

Для работы с недостаточно детерминированными величинами в настоящее время применя-

ются методы нечеткой (размытой) логики, чей аппарат дает возможность преобразовать лингвистические, размытые понятия в числовые, использовать их в решении слабоструктурированных задач и получать результаты в числовом виде.

Основу этого аппарата составляет теория нечетких множеств (НМ) [4]. Нечеткие методы характеризуются использованием лингвистических терминов вместо числовых (или в дополнение к ним), простые отношения описываются с помощью нечетких высказываний, а более сложные – нечеткими алгоритмами.

Специально разработанные методы обработки нечетких переменных (перевода лингвистических переменных и размытых оценок в числовой вид и получение таким образом функций принадлежности нечетких чисел разных классов [5]–[7], выполнение различного рода арифметических операций над ними [7], методы сравнения нечетких чисел [8]) позволяют быстро обрабатывать параметры сложных слабоструктурированных систем, в которых присутствует влияние человеческого фактора.

В настоящее время теория НМ эффективно применяется в различных сферах науки [7], [9], в том числе и для организации проведения экспертиз в сфере ИБ [10]–[12].

Мы предлагаем применить теорию НМ для построения нечеткой модели оценки уровня соответствия ИБ стандартам БС РФ при проведении экспертных оценок в БС согласно [2].

Приведенная в [2] Методика описывает порядок установления степени выполнения требований СТО БР ИББС-1.0 при проведении самооценки или внешнего аудита ИБ банка.

Чтобы определить итоговый уровень соответствия ИБ организации БС РФ требованиям [1], требуется оценить следующие направления:

– текущий уровень ИБ организации;

– менеджмент ИБ организации;

– уровень осознания ИБ организации.

Для этого используются групповые и частные показатели ИБ.

Групповые (EV_{Mi}) – используют для получения оценки по направлениям «текущий уровень ИБ организации», «менеджмент ИБ организации» и «уровень осознания ИБ организации» (это показатели EV_1, EV_2 и EV_3 соответственно).

Частные показатели входят в состав групповых показателей и представлены в виде вопросов, дав ответ на которые можно определить их частные оценки (EV_{Mij}).

В данной Методике экспертное оценивание используют аудиторы именно при оценке частных показателей. При этом заполняются специальные формы, в которые вносят эти оценки.

Выполнение частных показателей для определенной организации может быть обязательным, не оцениваемым или рекомендуемым.

Если выполнение частных показателей обязательно, то шкала степени их выполнения выглядит таким образом:

– «нет» – оценке присваивают значение «0»;

– «частично» – используют значения «0,25» либо «0,5», либо «0,75»;

– «да» – оценке присваивают значение «1».

Если в форме присутствует частный показатель для оценки требований, не относящихся, по каким-либо причинам, к рассматриваемой организации, то его не оценивают. Но тогда в рамках группового показателя должна быть выполнена процедура нормировки коэффициентов значимости оставшихся частных показателей ИБ.

Для частных показателей, выполнение которых рекомендуется, устанавливается такая шкала:

– «да» – оценке присваивается значение «1»;

– «нет» – частный показатель определяют, как неоцениваемый, при этом выполняют нормирование коэффициентов значимости оставшихся частных показателей ИБ в рамках группового.

Предлагаемая нами нечеткая модель оценки уровня соответствия ИБ стандартам БС РФ включает следующие этапы:

– определение групповых показателей в зависимости от оцениваемой области: оценки текущего уровня ИБ, менеджмента ИБ или уровня осознания ИБ в БС;

– выбор метода и, на основании мнения экспертов, формирование нечетких эталонов лингвистических термов для каждого из определенных видов требований – частных показателей [2]. Функции принадлежности нечетких эталонов лингвистических термов формируются исходя из заявленного количества участвующих экспертов и выбранного метода формирования данных функции [7];

– выбор метода и формирование функции принадлежности нечетких переменных оцениваемых требований;

– сравнение эталонных значений и полученных экспертами оценок. Применяемые методы сравнения нечетких переменных и их характеристики исследованы в работах [7], [8];

– установление соответствия полученных результатов определенному значению частного показателя согласно Методике;

– оценивание параметров, которые не содержат нечеткости;

– определение уровня соответствия ИБ стандартам БС РФ на базе специальной программы, предложенной, например, компанией ISM SYSTEMS. Программа на основе полученных частных параметров позволяет провести экспресс-самооценку ИБ банка.

Данная нечеткая модель оценки является гибкой: даже после начала проведения экспертизы могут быть изменены ее условия: количество экспертов [6], [7] или количество оцениваемых параметров. Причем это не будет поводом для повторных оценок и формирования новых эталонов. Корректировка полученных данных в зависимости от изменившихся условий происходит путем применения так называемых универсальных шкал, описанных в [14].

Предложенный подход позволит повысить эффективность проведения экспертиз ИБ банковской системы за счет учета качественных параметров. Он также может использоваться в оценках других сложных систем, особенно тех, в работе которых существенное влияние на результаты оценки имеет человеческий фактор.

Список источников

1. Стандарт Банка России СТО БР ИББС–1.0–2014. «Обеспечение информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации. Общие положения (5 редакция)». URL:https://www.cbr.ru/Crosscut/LawActs/File/446 12.01.2023 (дата обращения: 12.01.2023).

2. СТО БР ИББС–1.2–2014. «Обеспечение информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации. Методика оценки соответствия информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации требованиям СТО БР ИББС-1.0-2014 (4 редакция)». URL: https://www.cbr.ru/statichtml/file/59420/st-12-14.pdf (дата обращения: 12.01.2023).

3. Стандарт Банка России СТО БР ИББС-1.1-2007 «Обеспечение информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации. Аудит информационной безопасности» (введен в действие распоряжением ЦБР от 28 апреля 2007 г. № Р-345). URL: https://docs.cntd.ru/document/902042879 (дата обращения: 12.01.2023).

4. *Орлов А. И.* Нечеткое множество // Вероятность и математическая статистика. Энциклопедия. М.: БРЭ, 1999. С. 401.

5. *Корченко А. Г., Рындюк В. А., Пацира Е. В.* Классификация нечетких чисел для рационального применения в методах и моделях систем защиты информации // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення систем захисту інформації. в Україні: наук.-технічн. зб. К.: НДЦ «ТЕЗІС» НТУУ «КПІ». 2002. Вип. 5. С. 166–169.

6. *Корченко А. Г., Рындюк В. А.* Исследование методов формирования функций принадлежности на основе количественных парных сравнений // Захист інформації. 2003. № 3. С. 10–17.

7. *Корченко А. Г.* Построение систем защиты информации на нечетких множествах. Теория и практическое решение. К.: «МК-Пресс», 2006. 320 с.

8. *Душеба В. В., Потапов В. Г., Корченко А. Г.* Исследование методов сравнения нечетких чисел // Збірник наук. праць Інституту проблем моделювання в енергетиці. Вип. 8. Вид-во Львів: ПП «Системи, технології, інформаційні послуги», 2003, С. 12–21.

9. *Полянский Д. А.* Комплексная защита объектов информатизации. Оценка защищенности. Владимирский государственный университет. 2005. 78 с.

10. *Корченко А. Г., Рындюк В. А.* Экспертиза ТЗИ для программно-управляемых АТС на основе нечетких множеств // Материалы V Междунар. научно-технической конф. «АВИА-2003». Т. 2. К.: НАУ. 2003. С. 22.45–22.49.

11. *Рындюк В. А.* Организация экспертиз в системе ТЗИ на основе методов и моделей нечетких множеств // Матеріалы VI Міжнар. наук.-практ. конф. «Безпека інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах». К.: «Інтерлінк», НДЦ «ТЕЗІС» НТУУ «КПІ». 2003. С. 65–66.

12. *Рындюк В. А.* Использование методов нечеткой логики в решении задач защиты информации // Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах '22: Вторая Междунар. Науч. конф. (СПб., 11–15 апреля 2022 г.) сб. докл. СПб.: ГУАП, 2022. С. 294–297.

13. *Мелихов А. Н., Берштейн Л. С., Коровин С. Я.* Расплывчатые ситуационные модели принятия решений: учеб. пособие. Таганрог: ТРТИ, 1986. 92 с.

УДК 629.331.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-68-73**

Д. А. Светлов*
магистрант
С. С. Налегаев*
кандидат физико-математических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ И ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В АВТОМОБИЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ

Рассматриваются особенности технологий машинного обучения в автомобильном транспорте. Выполнен анализ распространенных проблем, возникающих при их разработке и реализации, включая некоторые методы решений. Обсуждаются другие потенциальные задачи, для решения которых возможно применение таких технологий.
Ключевые слова: *транспорт, автомобиль, безопасность, искусственный интеллект.*

D. A. Svetlov*
Postgraduate Student
S. S. Nalegaev*
PhD Sc. Rhys.-Math., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ANALYSIS OF THE FEATURES AND POTENTIAL FIELDS OF MACHINE LEARNING TECHNOLOGIES APPLICATION IN ROAD TRANSPORT

This paper discusses the specifics of machine learning technologies in the automobile transportation industry. An analysis of common problems encountered in their development and implementation is performed, including some solution methods. Other potential problems for which application of such technologies is possible are discussed.
Keywords: *transport, automobile, safety, artificial intelligence.*

Одним из распространенных применений технологий машинного обучения в автомобильном транспорте являются технологии беспилотного транспорта – транспортных средств, передвигающихся без экипажа на борту при помощи специальной системы автономного управления. Программное обеспечение управляет всеми его узлами: тормозит, ускоряется, меняет передачи, рулит, а сенсоры собирают для этого максимум информации об окружающей обстановке. Такой транспорт может передвигаться по специально выделенным полосам и заранее устанавливаемым маршрутам либо участвовать в общем движении.

Другими примерами возможных применения технологий на базе алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта в автомобильном транспорте можно назвать различные формы оснащения транспорта дополнительными интеллектуальными системами, которые предназначены не для замены функции водителя. Для решения других проблем в масштабах управления или эксплуатации как отдельного автомобиля, так и автодорожной транспортной системы в целом, в том числе проблем безопасности движения, такое оснащение может внедряться не только в сам транспорт, но и устанавливаться стационарно на придорожных территориях либо им могут оснащаться специальные подвижные, в том числе роботизированные комплексы (например, беспилотники, дроны и т. п.). Все это можно свести к автоматизации решений различных задач автотранспорта в целом.

Согласно «Транспортной стратегии России» до 2030 года в нашей стране планируется развитие высокоавтоматизированого и беспилотного транспорта, что должно повысить эффективность и безопасность грузовых и пассажирских перевозок, а также удовлетворенность конечных пользователей услуг, способствовать снижению себестоимости перевозок на 15 % и

Рис. 1. Беспилотный самосвал КАМАЗ «Юпитер 30»

повышению пропускной способности инфраструктуры до 10 %.

К 2024 году также планируется запуск автономных транспортных средств на пилотных участках «Единой опорной транспортной сети» России, а к 2035 году – внедрение беспилотного транспорта на всех ключевых маршрутах. Развитие беспилотных автомобильных перевозок в рамках стратегии планируется по двум направлениям: 1) внедрение автомобильных грузовых междугородних перевозок на ключевых магистралях – к 2024 году планируется запуск первых проектов беспилотных автомобильных грузовых перевозок на трассе М-11; 2) развитие грузовых и пассажирских перевозок в крупнейших агломерациях.

Относительно беспилотных автомобилей, их использование в малонаселенных и труднодоступных районах может повысить скорость и качество почтовых и курьерских услуг. Повышение грузоподъемности специализированных беспилотников вкупе с их удешевлением может стать триггером сокращения расходов на строительство и содержание сети аэродромов на удаленных территориях и иной транспортной инфраструктуры, а также привести к существенным изменениям на рынке электронной торговли.

Вместе с тем разработка беспилотного транспорта сталкивается со множеством проблем. Ниже рассматриваются примеры некоторых наиболее распространенных из них.

В частности, одной из них является проблема быстродействия и обработки больших объемов информации. В 1981 году вместе с выпуском первых серий операционных систем их разработчик Билл Гейтс утверждал, что объем памяти 640 килобайт достаточен даже для самой производительной вычислительной машины. Однако с ограниченными вычислительными ресурсами могут быть решены не все классы алгоритмических задач. Например, современный автомобиль с электрическим приводом и автопилотом «Tesla Model S» нуждается в обработке 25 гигабайт данных в час, обладая при этом не самым плохим с точки зрения оптимизации программным кодом. По мере увеличения уровня автономности автомобиля и развития (расширения) систем установленных на него датчиков объем данных для обработки возрастает многократно. Бывший CEO «Intel» Брайан Кржанич называл данные «новой нефтью», упоминая, что типичный беспилотный автомобиль может генерировать в день около 4 Тбайт данных. Однако данный им прогноз в настоящее время уже превышен в роботакси «AutoX», в которых 1 Тбайт данных генерируется уже за один час.

Актуальной является также проблема задержек при считывании и обработке данных. Например, задержка времени всего в 1 мс между считыванием информации и принятием решения о торможении на скорости в 30 км/ч приводит к увеличению тормозного пути автомобиля на 1 м, что может стоит жизни как водителю и пассажирам, так и пешеходам.

Не меньшее внимание важно уделять и надежности беспилотных систем. Пользователи домашних вычислительных машин потребительского типа (персональных компьютеров) часто сталкиваются с проблемой так называемых «зависаний» программного обеспечения. Проблема в этом сегменте домашних компьютеров без особых потерь решается перезапуском вычислительного устройства или его программного обеспечения. Однако в случае бортовых компьютеров автомобилей это может привести к появлению на дороге полуторатонного неуправляемого болида, несущегося на высокой скорости, что представляет крайне высокую опасность для пассажиров и окружающих людей. Тоже самое касается и датчиков: чтобы избежать проблем при сбоях или помехах на каком-то одном из датчиков, должно осуществляться его дублирование – только в этом случае автомобиль в любой момент времени сможет иметь достоверную информацию об окружающей его обстановке.

Также актуальны проблемы прогнозирования и проблемы доверия автономным беспилотным транспортным средствам. Полностью автономные автомобили должны быть способны предвидеть (предсказывать) действия и поведение других автомобилей также, как это делают люди. Водители-люди отлично умеют предсказывать поведение других водителей, даже с помощью небольшого количества данных, таких как зрительный контакт или жесты рук. В первую очередь автомобили должны согласовать правила дорожного движения, чья очередь про-

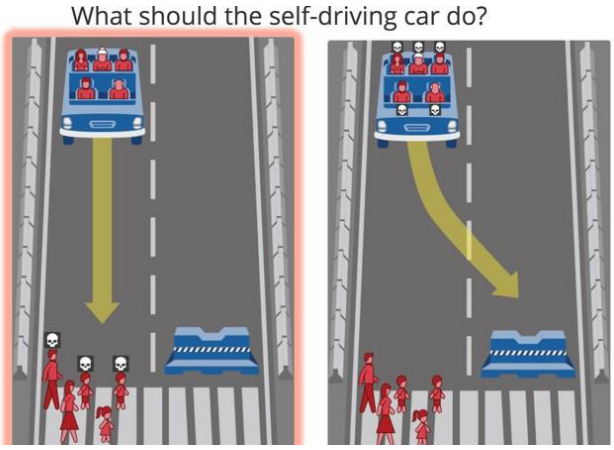


Рис. 2. Пример моральной дилеммы из эксперимента MIT

езжать перекресток, и так далее. Это масштабируется в проблему увеличения неопределенности, когда на дороге существуют как автомобили, управляемые человеком, так и беспилотные автомобили. Ожидается, что в надежных автономных автомобилях должно быть улучшено понимание «знаков» окружающей среды для решения этой проблемы.

Из-за случаев перемещений по дорогам пешеходов, не регламентированных правилами дорожного движения, а также непредсказуемых условий внешней среды часто невозможно полностью избавиться от аварий беспилотного транспорта (в т. ч. с летальным исходом). При этом технологии машинного обучения при управлении и контроле движения транспорта позволяют заранее тонко настраивать поведение автомобиля в различных ситуациях в широком ряде их различных вариаций. Все это уже привело к появлению других трудных для разрешения проблем философского и морального характера. В основном, их все можно свести к так называемой проблеме вагонетки. На практике ее можно описать простым примером. Предположим, на пути следования автомобиля неожиданно появляется пешеход, времени на торможение нет. Спасти его жизнь можно, лишь направив автомобиль в сторону. Однако в этом случае он на высокой скорости столкнется с препятствием (рис. 2), погибнет уже пассажир автомобиля. Существует множество вариаций проблемы в том числе с животными, детьми, женщинами или группами людей на пути транспорта и т. п. Перед автопилотом в таких моральных задачах встает выбор: решить, кому сохранить жизнь в зависимости от принятого решения, а кем пожертвовать. Как очевидно, задача не имеет никакого, хоть сколько-то претендующего на объективность решения. На базе института MIT проводился опрос людей в Интернете на тему, кого (по их мнению) следует спасти в тех или иных различных ситуациях. Результаты опроса позволили выделить три наиболее популярных варианта: люди обычно выбирают «спасти» людей вместо животных, спасти молодых вместо старых и большие группы вместо малых. Результаты разнятся в зависимости от стран. Исследователи разделили страны на несколько групп: «восточные», «западные» и «южные». Южные страны чаще всего «спасали» молодых людей, особенно в сравнении с восточными (жители которых чаще выбирали спасение для пожилых).

Из неизбежности аварий беспилотного транспорта также вытекает и проблема определения ответственности за ущерб, причиненный беспилотным транспортным средством, и его регулирование. В частности, директором «Центра исследования транспортных проблем мегаполисов» НИУ ВШЭ Константином Трофименко высказывалось мнение, что все технологические проблемы беспилотного транспорта более или менее решаемы, в отличие от проблем нормативно-правовых, а также – целого комплекса проблем, связанных с ДТП с участием беспилотников, определением виновника этих аварий и т. п.

В России существует действующее постановление Правительства от 26 ноября 2018 года № 1415 «О проведении эксперимента по эксплуатации на автодорогах высокоавтоматизированных транспортных средств» (далее – Постановление). Указанный эксперимент проводится на территориях города Москвы (Сколково) и Республики Татарстан (Иннополис) с 1 декабря 2018 года по 1 марта 2022 года. Исходя из целей и задач эксперимента, которые указаны в пункте 4 Положения «О проведении эксперимента по опытной эксплуатации на автомобильных дорогах общего пользования высоко-автоматизированных транспортных средств», утвержденного Постановлением, можно сделать вывод, что его сущность сводится к тому, чтобы наладить работу беспилотных транспортных средств для дальнейшей массовой эксплуатации на дорогах общего пользования, а также сформулировать положения для выработки технических требований и регламентов, необходимых документов по стандартизации такого беспилотного транспорта.

Таким образом, рассматривая внедрение беспилотного транспорта и его проблемы, можно выделить, с одной стороны, уже существующие успешные примеры реализации таких решений с точки зрения технического воплощения. С другой стороны, необходимо выделить

ряд принципиально нерешаемых или неоднозначно решаемых моментов, связанных с морально-философскими дилеммами, проблемами правового регулирования такого транспорта. С третьей стороны, следует отметить все возрастающие требования к производительности вычислительного оборудования, необходимого для управления беспилотными транспортными средствами, что может приводить к фантастическим рекордам финансовой стоимости таких автомобилей (особенно в сравнении с обычным транспортом).

Вместе с тем применение технологий, основанных на использовании алгоритмов искусственного интеллекта в автомобильном транспорте, не ограничено направлением беспилотных автомобилей. Существует множество других направлений как уже реализованных, так и внедрение которых возможно лишь потенциально. Программно-аппаратная часть таких решений может быть физически локализована не только в самом автомобиле, но и вне его. В частности, реализованы решения для повышения общей безопасности на автодорогах за счет средств проверки скоростного режима автомобилей с использованием стационарно установленных цифровых камер и систем интеллектуальной обработки фотоснимков, автоматически считывающих номерные знаки нарушителей. Эти же системы могут быть использованы для автоматизированного выявления автомобилей с конструктивными дефектами, для повышения безопасности на дорогах за счет автоматической фиксации лиц, находящихся в розыске, фиксации правонарушений и т. п. Также существуют системы оценки скоростного режима с беспилотных летательных аппаратов [5] или на базе других автомобилей, передвигающихся в том же потоке транспорта, который ими оценивается [6] (оценка скорости в процессе собственного движения).

Отдельным направлением можно выделить применение технологий машинного обучения в задачах оценки различных параметров дорожного тракта и его отдельных составляющих элементов или его окружения. Своевременное выявление износа или повреждений отдельных элементов автодороги повышает безопасность автотранспорта. Разработаны методы [7] для оценки износа дорожной разметки. Также существуют универсальные коммерческие технические системы на базе передвижных автомобилей-лабораторий [8], кроме оценки износа разметки, выполняющие ряд других оценок с фото и видео фиксацией дефектов. Недостатком этих универсальных высокоточных систем является проблема их колоссальной финансовой стоимости, в связи с которой парк таких мобильных лабораторий ограничен и не позволяет быстро реагировать на появление дефектов автодорог, быстро охватывать крупные протяженности автодорожной сети и т. п.

Далее стоило бы поразмышлять о потенциально актуальных направлениях разработки. Учитывая все возрастающий интерес к формированию систем цифрового мониторинга и контроля общественной обстановки, можно выделить потребности во все более широком охвате систем автоматического анализа видеопотока, записываемого с использованием разнородной сети цифровых камер, установленной в общественных местах (на улицах, в терминалах банкоматов, в метро и т. п.). Разработки в сторону попыток создания единых систем хранения, обработки и анализа видеопотока с сетей цифровых камер ведутся давно. Вместе с тем логично предположить, что следующим возможным этапом развития таких систем может быть расширение сетей видеофиксации. В частности, охват ареала фиксации таких систем может претерпеть эволюцию от изначально только стационарно расположенных цифровых камер (в отдельных точках, например, на стенах зданий на улицах города, дорогах, банкоматах и т. п.) – в сторону распространения функций захвата, в том числе до фиксации и контроля видеопотока, регистрируемого камерами, установленными в огромном парке частных автомобилей (к рассмотрению возможны и другие виды транспорта). Это позволит увеличить покрытие контролируемой зоны, расширить ее за пределы населенных пунктов.

С учетом того, что практически в каждом автомобиле установлен видеорегистратор, представляется возможной разработка решений в формате распределенной сети, предназначенной для фиксации разного типа событий на базе технически несложных, легковесных и одновременно экономичных решений, реализованных на базе парка самых простых частных автомобилей. Такие решения в потенциале могли бы применяться как для фиксации фактов правонарушений на дороге и поиска наиболее разыскиваемых лиц из списков всероссийского и всемирного розыска, так и для выполнения аналогичных, как в системах типа [8], оценок износа отдельных элементов автодорог или их окружения. Например, для выполнения тех же оценок износа дорожных знаков или дорожной разметки (пусть, и более грубых). В отличие от универсальных лабораторных систем типа [8], к недостаткам таких

решений, скорее всего, можно будет отнести их более высокие уровни погрешностей измерений и сокращенный ряд оцениваемых параметров. Однако к числу их существенных преимуществ, пожалуй, можно было бы отнести значительно большее число передвижных единиц, способных выполнять оценки параметров, больший охват зон покрытия и, как следствие, значительное сокращение времени «реакции» – между появлением новых дефектов автодорог и их фиксацией (с последующим уведомлением соответствующих ответственных за это служб и т. п.). Поток кадров с видеорегистраторов, устанавливаемых в настоящее время практически в каждом частном и не только автомобиле в потенциале можно было бы анализировать даже не очень сложным программным обеспечением на платформе Android распространенных серий смартфонов.

Следовало бы рассмотреть возможные варианты внедрения таких систем. Представляется вполне реализуемым вариант с разработкой программного обеспечения (ПО) для платформы Android, пригодного для простой установки в популярные серии смартфонов, с решением задачи передачи показаний установленного в автомобиле видеорегистратора на ПО в смартфоне для его локального анализа. В качестве альтернативы решениям на базе платформы Android такие системы можно было бы также реализовать посредством дооснащения автомобилей отдельными небольшими и экономичными модулями с простым и несложным способом установки внутри салона автомобиля (не превышающей сложность установки видеорегистратора). Они могут быть предназначены как для записи видео с функциями его передачи в ПО на смартфоне, так и для комплексных задач записи видео с его одновременной обработкой (чтобы освободить от лишних вычислительных операций смартфон водителя, улучшить режим работы в сторону большей надежности и бесперебойности работы и т. п.). Также стоило бы рассмотреть варианты аналогичного оборудования, но устанавливаемого в рамках заводских опций комплектации автомобилей. Представляется возможным и направление разработки специализированных версий видеорегистраторов класса «все в одном» (со встроенным микропроцессором для анализа видеопотока с использованием различных алгоритмов машинного обучения). Автомобильные видеорегистраторы с похожими возможностями анализа изображений на основе интеллектуальных алгоритмов машинного обучения уже существуют [9], поэтому задача разработки таких устройств является более чем реальной (остается лишь переориентировать обработку видео на фиксацию других событий и добавить функции сетевого оповещения).

Распространить систему на значительную часть парка частных автомобилей можно было бы за счет маркетинговых или экономических стимулов. Привлечь автовладельцев к повсеместному использованию таких технических средств можно было бы, например, за счет небольшой помесячной оплаты поддержания этих средств в рабочем состоянии. В частности, известно, что владельцам технических систем, применяемых для оценки скорости транспорта на автодорогах, выплачиваются проценты от штрафов нарушителей скоростного режима. Возможно было бы внедрить похожее финансовое стимулирование. Представляется возможным также и полное финансирование установки и настройки технических средств на автомобиль с одновременным предоставлением системы скидок на оплату топлива или других небольших преференций в тех или иных автомобильных сервисах (в т. ч. скидок при оплате штрафов и т. п.) в случае поддержания этого оборудования при поездках в рабочем режиме. Такая система, очевидно, не сможет обеспечить передачу видеопотока на удаленные серверы в силу ограничения ширины мобильных каналов передачи данных операторов связи. Однако систему можно было бы настроить на более грубый локальный анализ изображений имеющимися вычислительными мощностями с последующей передачей небольших пакетов информации только при фиксации тех или иных событий, выявлении дефектов автодорог и т. п. С учетом реализации в виде распределенной системы (наподобие сети устройств Интернета вещей Яндекс.Карт), можно было бы реализовать интеллектуальное реагирование на появление событий с компенсацией низкой точности оценок. Например, система могла бы быть настроена таким образом, что этап реагирования на появление сообщений наступает только в случае подтверждения фиксации от нескольких участников дорожного движения. При соответствующем оснащении автомобиля такие системы можно расширить на анализ данных, поступающих с других установленных в автомобиле датчиков.

Некоторые похожие системы существуют. Например, проводились попытки внедрения функционала загрузки данных об участках обледенения автодорог, считываемых установленными в автомобилях датчиками, в облачные хранилища, для анализа коммунальными

службами [9]. Кроме этого, сервис «Яндекс. Карты» является распределенной системой, используемой для поиска пробок на автодорогах. Однако по сведениям авторов, в настоящее время еще не разработаны аналоги распределенных систем для оценки износа элементов автодорог и их окружения (дорожных знаков и дорожной разметки) или для целей безопасности – фиксации правонарушений либо поиска лиц, находящихся в розыске и т. п. Поэтому указанные направления можно считать достаточно актуальными для исследования.

Список источников

1. *Campbell M., Egerstedt M., How J.* Autonomous driving in urban environments: Approaches, lessons and challenges // Phil. Trans. R. Soc. A. 2010. Vol. 368. P. 4649–4672.

2. Беспилотные автомобили: новая нефть, искусственный интеллект и 5G. URL: https://habr.com/ru/company/seagate/blog/552356/ (дата обращения: 14.01.2023).

3. О проведении эксперимента по эксплуатации на автодорогах высокоавтоматизированных транспортных средств. URL: http://government.ru/docs/34831/ (дата обращения: 14.01.2023).

4. Машина морали. URL: https://www.moralmachine.net/hl/ru (дата обращения: 14.01.2023).

5. Автовзгляд. ГИБДД начала фиксировать нарушения ПДД с помощью дронов. URL: https://www.avtovzglyad.ru/gai/pdd/2019-08-02-imeet-li-gibdd-pravo-fiksirovat-narushenie-pdd-s-pomoschju-dronov/ (дата обращения: 14.01.2023).

6. РБК. В ГИБДД сообщили о новых устройствах для контроля скорости автомобилей. URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/16/10/2019/5da755319a794742ddd2d6ec (дата обращения: 14.01.2023).

7. *Вихляев В. В., Кулаков С. А., Разумовский Г. В.* Оценка износа дорожной разметки // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 8. С. 44–49.

8. Росдортех. Передвижная дорожная лаборатория RDT-line. URL: https://www.rosdorteh.ru/catalog/214/ (дата обращения: 14.01.2023).

9. Хабр. Под надзором: системы безопасности современного автомобиля. URL: https://habr.com/ru/company/cansonic_russia/blog/376995/ (дата обращения: 14.01.2023).

УДК 621.39, 615.47:616-072.7 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-74-77**

А. М. Сергеев*
кандидат технических наук, доцент
Е. В. Самохина**
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
***МИРЭА – Российский технологический университет*

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ONLINE-МОНИТОРИНГА

Рассматриваются вопросы обеспечения надежного функционирования систем удаленного online-мониторинга состояния пациентов; угрозы нормальному функционированию таких систем, включая существующие проблемы общего характера, глобальных коммуникаций, неправильных действий пациентов. Предлагается ряд решений, повышающих надежную работу систем online-мониторинга.
Ключевые слова: *online-мониторинг, глобальные коммуникации, мобильность пациентов, надежность носимых устройств, журнал событий.*

A. M. Sergeev*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
E. V. Samohina**
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
***MIREA – Russian Technological University*

PROBLEMS OF ENSURING THE RELIABILITY OF ONLINE MONITORING SYSTEMS

The issues of ensuring the reliable functioning of systems for remote online monitoring of the condition of patients are considered. Threats to the normal functioning of such systems are considered, including existing problems of a general nature, global communications, and incorrect actions of patients. A number of solutions are proposed that increase the reliable operation of online monitoring systems.
Keywords: *online monitoring, global communications, patient mobility, wearable device reliability, event log.*

Сегодня снижение мобильности в больших городах в условиях пандемий и аномальных природных явлений требует от медицинских учреждений активного использования систем online-мониторинга, создаваемых на основе глобальных коммуникаций и технологии *Internet of medical things* (IoMT) [1], [2]. Носимые пациентами устройства активно включаются в состав распределенных систем наблюдения за состоянием инвалидов, кардиологических больных и беременных женщин [3]. Указанные системы позволяют этой категории граждан находиться под постоянным наблюдением врачей без погружения в технологию [4].

Возможные реализации таких систем предлагаются в [3], [5]–[7]. Носимые пациентами устройства в них, выполняющие функции online-мониторов, находятся на постоянной связи через Интернет-коммуникации с сервером медицинского учреждения. Взаимодействие врачей с online-мониторами становится легким и эффективным, а процесс доступа к таким новшествам – прозрачным.

При увеличении вычислительной мощности и снижении массы и габаритов online-мониторы можно рассматривать как устройства, способные не только регистрировать и накапливать результаты измерений параметров организма, но и обрабатывать их, выходя на связь с сервером медицинского учреждения лишь при появлении признаков развития неблагоприятных процессов у пациента.

При кажущейся проработанности решений по созданию распределенных систем на основе Интернет следует обратить внимание на актуальные проблемы, влияющие на правильность функционирования и надежность собираемых данных online-мониторами в распределенных

системах наблюдения за состоянием пациентов.

Особенности online-мониторинга

Облик систем дистанционного online-мониторинга при обеспечении мобильности определяется объединением технологий глобальных коммуникаций и IoMT. Такое решение минимизирует требования к пациенту-пользователю и не ограничивает его перемещений.

Известно использование для указанных целей только смартфонов [8], [9] с программным обеспечением, которое осуществляет сбор информации, например, у кардиологических больных [10], [11]. В смартфоне даже среднего класса есть датчики ускорений, система позиционирования, интерфейс Bluitooth, канал Wi-Fi, 802.11 и разъем для проводного интерфейса. Проводной интерфейс обеспечивает подключение дополнительных внешних датчиков [12] или носимого устройства, которые расширяют функциональность смартфона в роли online-монитора – и это второй вариант реализации.

Укрупненно взаимодействие смартфона и носимого устройства в составе online-монитора представлено на рис. 1.

Носимое устройство, имея собственный аккумуляторный источник питания [14] и SD карту памяти для регистрации событий от датчиков, обеспечивает оптимальное распределение вычислительной нагрузки и памяти между ним и смартфоном.

Появлению миниатюрных носимых устройств для online-мониторов на базе смартфонов способствовал выпуск сверхчувствительных микроминиатюрных датчиков и медицинских анализаторов, а также повышение вычислительных мощностей микропроцессоров [14]. Это привело к росту количества аппаратных решений и разработок программного обеспечения для носимых устройств online-мониторов на основе IoMT, в том числе в Российской Федерации [15].

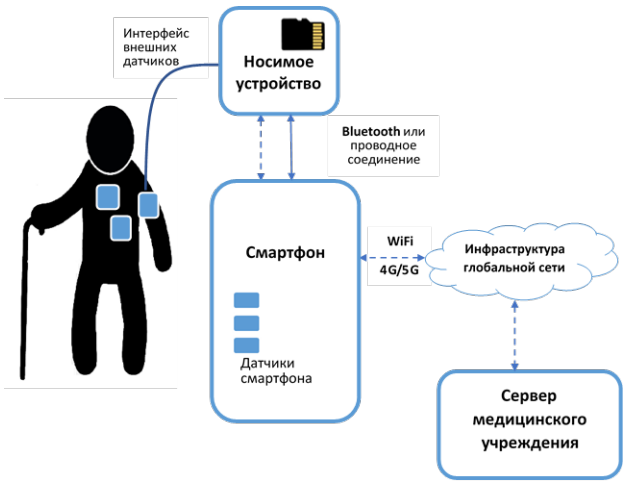


Рис. 1. Взаимодействие смартфона и носимого устройства в составе online-монитора

Предотвращение угроз, влияющих на надежность online-мониторинга

Надежное функционирование систем online-мониторинга связано с предотвращением ряда угроз. Это угрозы, связанные с качеством связи в сети мобильного оператора для коммуникаций через сеть Интернет, с функционированием носимого устройства, а также с действиями пациентов.

Коммуникации в системе online-мониторинга должны обеспечиваться непрерывной и надежной связью, переключения между технологиями Wi-Fi, 3G/4G/5G, WiMax и др. Большое значение также имеют «бесшовный» роуминг при перемещении пациента на транспорте и приоритет обслуживания системы в местах массового скопления людей, такие как спортивные сооружения, объекты культуры и образования и др.

Сегодня в пользу обеспечения указанных требований можно отметить значительное улучшение качества коммуникаций в сетях операторов мобильной связи за счет повышения надежности соединений, увеличения пропускной способности сетей связи, поддержки различных технологий подключения.

Улучшения систем связи последнего времени способствует повышению надежности функционирования систем online-мониторинга. В частности, внедрение технологии 5G позволяет надеяться, что в наиболее сложных условиях – в местах массового скопления людей с мобильными устройствами будет гарантировано приоритетное подключение online-мониторов к сети [16], [17], а также непрерывность мониторинга биометрии пациента даже при переключении с одной технологии передачи данных на другую.

Для обеспечения контроля правильности функционирования носимого устройства в составе online-монитора в работе [18] предложено формирование его внутреннего файла, называемого «журналом событий». Такой журнал, реализуемый на отдельной микросхеме EEPROM, позволяет фиксировать события в online-мониторе, а также действия пациента для последующего анализа с целью исключения в дальнейшем неправильных его действий.

Каждая запись в журнале событий имеет размер 5 байт, которые распределены на 7 полей следующим образом: Y – год [4 бита], Mo – месяц [4 бита], D – дата [5 бит], H – час [5 бит], Mn – минута [6 бит], S – секунды [6 бит], EC – код события [8 бит].

Коды событий охватывают более 120 состояний и кодов аварийных остановов работы носимого устройства, которые можно представить группами, привязанными к модулям и процессам в нем.

Во-первых, регистрируются остановы в связи с перегревом по причине размещения на теле или в кармане одежды пациента (отсутствие теплоотвода) и по результатам самодиагностики в процессе включения и работы процессора носимого устройства.

Для предотвращения потери регистрируемых носимым устройством параметров пациента при перегреве может использоваться отслеживаемое выхода датчика температуры или периодическое выключение/включение устройства. Это позволяет исключить его перегрев и выход из строя отдельных модулей.

Во-вторых, регистрируются сбои в работе компонентов носимого устройства: модуля мобильной связи, интерфейсов, модулей сменной SD-памяти и др.

В-третьих, регистрируются сбои от ошибок включения/выключения, сетевого подключения, неправильных действий пациента. Пациент, не являясь профессиональным пользователем монитора способен своими действиями внести в процесс online-мониторинга коррективы, приводящие к его нарушению.

Приведенный неполный список событий в носимом устройстве, регистрируемых в «журнале событий» помогает определить наличие неисправностей или неправильных действий пациента.

Доступ к журналу событий имеет только СПО сервера медицинского учреждения при непосредственном подключении к нему. Анализ регистрируемых сбоев и отказов, неправильных и несанкционированных (инструкцией пользователя) действий пациента способствует доработке общих рекомендаций по использованию online-монитора или дообучению конкретного пациента. Наличие свободного пространства в представлении кодов событий позволяет вносить в список регистрируемых все новые, часто встречаемые события.

Изложенный подход использован при разработке экспериментального макета аппаратно-программного комплекса для мониторинга состояния беременных женщин [3].

Заключение

Объединение технологий глобальных коммуникаций и IoMT открывают перспективы создания медицинских систем online-мониторинга за состоянием инвалидов и беременных женщин, людей с хроническими заболеваниями. Такие решения становится определяющими при постоянном наблюдении за пациентами в условиях чрезвычайных ситуаций и пандемий, ограниченной мобильности пациентов с патологиями.

Носимые устройства как дополнение к смартфону в составе online-мониторов повышает его функциональность, обеспечивая наблюдение за большим числом параметров пациентов и возможность разработки приложений с искусственным интеллектом для их обработки непосредственно в online-мониторах для разгрузки коммуникаций и сервера медицинского учреждения.

Ведение и своевременный анализ «журнала событий» позволяет повысить надежность функционирования online-монитора с носимым устройством.

Список источников

1. *Taiwo O., Ezugwu A.* Smart healthcare support for remote patient monitoring during covid-19 quarantine // Informatics in Medicine Unlocked. 2020. Vol. 20. P. 100428.

2. *Wurzer D., Spielhagen P., Siegmann A.* Remote monitoring of COVID-19 positive high-risk patients in domestic isolation: A feasibility study // PLOS One. 2021. P. 0257095.

3. *Корнеева И. П., Крамарь К. А., Семенова Е. А.* Аппаратно-программный комплекс для удаленного мониторинга и контроля состояния беременных женщин // Информационно-управляющие системы. 2021. № 6. С. 21–30.

4. IoT in Healthcare Expectations for 2020. URL: https://www.digitalinformationworld.com/2020/02/iot-in-healthcare-expectations-for-2020.html (дата обращения: 02.09.2022).

5. *Iranpak S., Shahbahrami A., Shakeri H.* Remote patient monitoring and classifying using the internet of things platform combined with cloud computing // Journal of Big Data. 2021. Vol. 8. P. 120.

6. *Van den Heuvel J., Teunis C., Franx A.* Home-based telemonitoring versus hospital admission in high risk pregnancies: a qualitative study on women's experiences // BMC Pregnancy Childbirth. 2020. Vol. 20. N 77.

7. *Mohammed K., Zaidan A., Zaidan B.* Real-time remote-health monitoring systems: A review on patients

prioritisation for multiple-chronic diseases, taxonomy analysis, concerns and solution procedure // Journal of Medical Systems. 2019. Vol. 43. P. 223.

8. Smartphone as a diagnostic device. Opportunity Overview. URL: https://evercare.ru/smartfon-kak-diagnosticheskoe-ustroistvo-obzor-voz (дата обращения: 07.10.2022).

9. *Kakria P., Tripathi N., Kitipawang P.* A real-time health monitoring system for remote cardiac patients using smartphone and wearable sensors // International Journal of Telemedicine and Applications. 2015. N 373474.

10. CardioSecur. URL: https://www.cardiosecur.com/ (дата обращения: 07.09.2022).

11. Kardimonitor CardioQVARK. URL: https://cardioqvark.ru/ (дата обращения: 07.09.2022).

12. *Юлдашев З. М., Рагеб Ага М.* Метод и аппаратно-программный комплекс для оценки функционального состояния и эффективности носимых online-кардиомониторов // Биотехносфера. 2019. № 6. С. 10–15.

13. *Востриков А. А., Куртяник Д. В., Сергеев А. М.* Источники питания мобильных оптико-информационных систем // Universum: технические науки. 2017. № 4 (37). С. 40–45.

14. *Yoshimoto M., Izumi S.* Recent Progress of Biomedical Processor SoC for Wearable Healthcare Application: A Review // IEICE Transactions on Electronics. Vol. E102-C. N 4. P. 245–259.

15. Analytical studies. Internet of Things: potential of Russian companies. URL: https://www.instel.ru/izdaniya/inform-material/internet-veshchey-potentsial-rossiyskikh-kompaniy/ (дата обращения: 09.09.2022).

16. *Sergeev A., Blaunstein N.* Evolution of Multiple-Access Networks – Cellular and Non-cellular – in Historical Perspective. Part 1 // Информационно-управляющие системы. 2018. № 4. С. 86–104.

17. *Sergeev A., Blaunstein N.* Evolution of Multiple-Access Networks – Cellular and Non-cellular – in Historical Perspective. Part 2 // Информационно-управляющие системы. 2018. № 5 (96). С. 94–103.

18. *Сергеев А. М.* Обеспечение надежности носимых устройств систем удаленного online-мониторинга // Биомедицинская радиоэлектроника. 2022. Т. 25. № 6. С. 52–59.

УДК 004.772 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-78-81**

Р. Р. Фаткиева*
кандидат технических наук, доцент
А. С. Судаков*
аспирант
**Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*

МЕТОД ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ДИНАМИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЕМ ХАРАКТЕРИСТИК КОПИРОВАНИЯ

Рассмотрен подход, позволяющий динамически менять характеристики копирования данных и их передачу по сетевой инфраструктуре в зависимости от загруженности вычислительной системы и каналов связи. На модельном примере показаны преимущества данного подхода.
Ключевые слова: *копирование информации, передача данных, методы сжатия информации, производительность систем, пропускная способность сети.*

R. R. Fatkieva*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. A. Sudakov*
PhD Student
**St. Petersburg Electrotechnical University LETI*

THE METHOD OF DATA TRANSFER WITH DYNAMIC CHANGE OF COPY OPTIONS

An approach is considered that allows you to dynamically change the characteristics of data copying and their transmission over the network infrastructure, depending on the workload of the computing system and communication channels. A model example shows the advantages of this approach.
Keywords: *data transfer, data transmission, data compression methods, system performance, network bandwidth.*

Введение

В современном мире каждый день увеличивается количество информации, которое образуется в различных направлениях деятельности общества. В результате появляются новые требования для решения тех задач, которые предполагают выработку огромных объемов данных. Согласно прогнозу исследовательской консалтинговой компании IDC Россия (International Data Corporation), общий объем всех данных в мире изменится от 64 зеттабайт в 2020 году до 175 зеттабайт к 2025 году [1]. Такой рост показателей связывается с увеличением количества умных гаджетов, роботов и устройств, окружающих нас каждый день (IoT), которые производят значительное количество данных. Но большая часть данных, созданных до 2020 года, была безвозвратно удалена в 2021 году [2]. Поэтому с увеличением объема генерируемых человечеством данных увеличивается потребность в хранилищах для большого объема информации, а также в методах и средствах передачи этой информации. В настоящее время существует огромный перечень проблем, связанных с передачей больших объемов информации, таких как: продолжительность времени копирования больших объемов данных; копирования данных из нескольких источников; разнородность передаваемых данных (только большие файлы, только маленькие, смешанные наборы данных) [3]; проблема копирования большого количества файлов небольшого размера [4]. Отдельно встает проблема передачи данных между системами, которые несовместимы по типу хранения данных или по вариантам доступа к ним. А также проблема обеспечения безопасности при передаче трафика по общественным сетям, с возможностью шифрование и расшифрование большого количества информации, которое приводит к дополнительной нагрузке на конечные узлы.

Как видно из предложенных решений [3], [4], для увеличения скорости копирования большо-

го количества данных, состоящих из файлов небольшого объема, множество небольших файлов целесообразно объединить в один файл, например, файлом архива без сжатия. Однако данный метод имеет недостаток, при котором на операцию архивирования затрачивается часть системных ресурсов и времени, что уменьшает производительность системы в целом. Особенно это становится заметно, когда запускаются процессы параллелизма и количество одновременных операций архивирования и извлечения из архивов возрастает до нескольких десятков. Таким образом, в настоящее время имеется противоречие между максимально возможной скоростью копирования и загрузкой системы по CPU, поэтому разработка методов копирования с возможностью динамического изменения характеристик копирования является актуальной. В данный момент для передачи больших объемов информации используют такие инструменты, как Grid FTP [5], FDT [6], Robocopy, SCP, rsync и другие, которые не всегда успешно решают данную проблему.

Постановка проблемы

Для передачи и последующего хранения большого количества информации используют: операции сборки архива, передачи данных и извлечения данных из архива, которые занимают значительное количество времени выполнения. Поэтому целесообразно создавать архивы данных небольших объемов, с передачей их по сети по мере готовности. В этих условиях требуется разработать подход, позволяющий динамически менять характеристики копирования данных и передачи их по сетевой инфраструктуре в зависимости от загруженности вычислительной системы и каналов связи.

Метод передачи данных с возможностью динамического изменения характеристик копирования

Традиционно для оценки производительности вычислительной системы используют такие измеряемые характеристики, как: уровень загрузки процессора и оперативной памяти, скорость передачи файлов и др., которые позволяют произвести оценку оптимальности выполнения того или иного процесса, при решении поставленных задач. При таком подходе в общем виде необходимо разработать такой алгоритм функционирования вычислительной системы, который позволит балансировать на уровне максимально-допустимой загрузки процессора, оперативной памяти, загруженности канала передачи и количества одновременно выполняемых задач, которые могут понадобиться для выполнения основных сервисов.

Тогда модель передачи данных с возможностью динамического изменения характеристик копирования можно представить кортежем

$$C_n, U_n, S_{n,}, V_n, L, CPU_{str}, CPU_{\text{dst}}, VF, t_n, \quad (1)$$

где C_n – скорость создания архива n; U_n – скорость извлечения файлов из архива на стороне приемнике; S_n – скорость передачи архива; V_n – объем архива; L – список файлов исходной директории; CPU_{str} – текущая загрузка процессора источника; CPU_{dst} – текущая загрузка процессора приемника; VF – объем файлов для передачи; t_n – время затраченное на передачу архива n.

Метод будет состоять из следующих шагов:

1) выполнить оценку загрузки процессоров источника и приемника на заданный промежуток времени. Для этого необходимо осуществить оценку текущей загрузки процессора к возможному допустимому порогу, так что

$$CPU_{src} < CPU_{\text{max–src}}, CPU_{\text{dst}} < CPU_{\text{max–dst}}, \quad (2)$$

где $CPU_{\text{max–src}}$ – максимальный возможный процент загрузки процессора источника; $CPU_{\text{max–dst}}$ – максимальный возможный процент загрузки процессора приемника;

2) произвести оценку общего объема файлов, требуемых для передачи по сети (VF). Для этого необходимо создать список всех файлов с путями их размещения и размером каждого файла. В результате этого шага во временной директории должен быть сформирован список файлов (L).

3) осуществить передачу файла L от источника к приемнику;

4) определить первоначальную пропускную способность сети S_0 путем измерения скорости передачи файла L

$$S_0 = V_L / t_L, \quad (3)$$

где V_L – размер передаваемого файла L, t_L – затрачиваемое на передачу время;

5) установить размер первого файла данных V_1 требуемого для передачи по сети на основании полученной загрузки процессора источника (2) и пропускной способности сети (3);

6) из списка файлов, сформированного на шаге 2, осуществить последовательный выбор блока данных для передачи из списка L с таким расчетом, чтобы его объем не превышал пара-

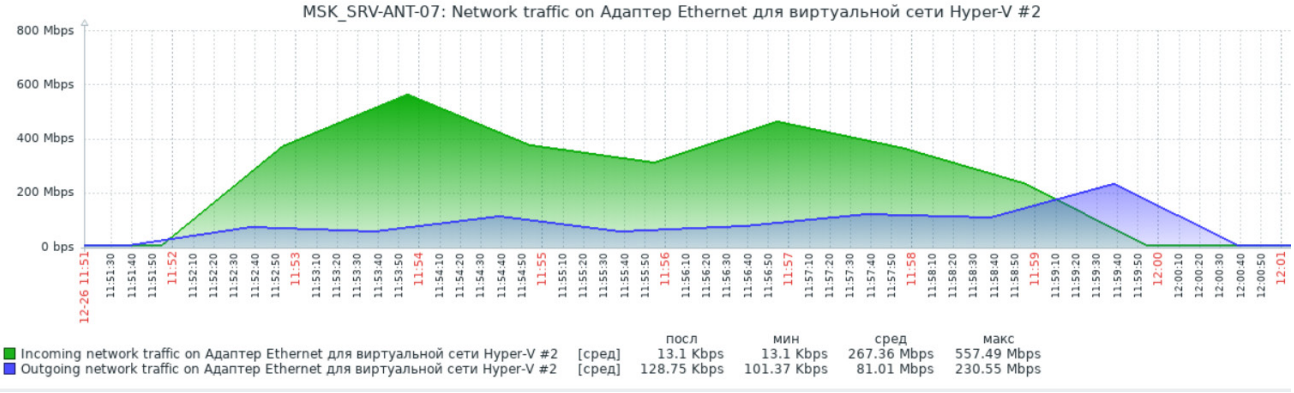


Рис. 1. Загрузка сети без применения динамического изменения характеристик копирования

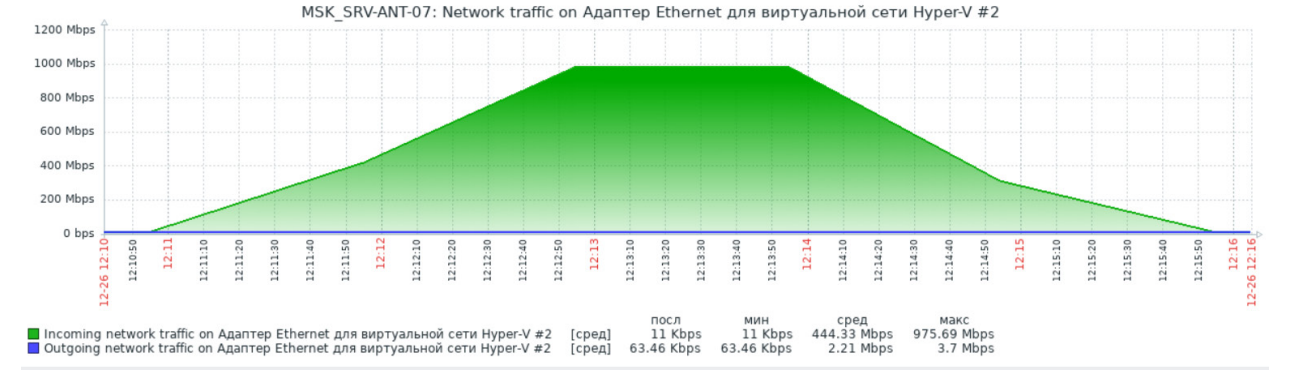


Рис. 2. Загрузка сети с применением метода динамического изменения характеристик копирования

метр, определенный на шаге 5. Далее сформировать последовательный блок данных во временную директорию. Одновременно с этим произвести оценку времени, затрачиваемого на эту операцию создания архива и загрузку процессора;

7) передать последовательный блок данных по сети и оценить скорость передачи архива (3), параллельно запустить процесс создания нового последовательного блока данных из списка L, основываясь на данных о загрузке CPU_{src}, оценке скорости создания архива, загрузке CPU_{dst} и скорости извлечения файлов на приемнике;

8) по окончании создания архива нового последовательного блока данных запустить его копирование и перейти к созданию следующего файла архива нового последовательного блока данных, основываясь на показателях работы системы из предыдущего шага;

9) повторить шаги п. 6–8 для оставшегося объема информации. Перед каждой итерацией необходимо проводить анализ по собранным данным функционирования вычислительной системы на предыдущем шаге и своевременно вносить коррективы в размер создаваемого блока данных с учетом загрузки информационно-вычислительной системы и пропускной способности сети;

10) после каждой завершенной операции копирования, необходимо производить мониторинг характеристик функционирования вычислительной системы приемника. Это позволяет в случае отсутствия превышения пороговых значений (2) осуществить разархивирование очередного файла архива во временную директорию на стороне получателя с дальнейшим перемещением файлов в конечную директорию назначения (как указано в файле L).

Также для стороны отправителя целесообразно предусмотреть формирование сообщений о приеме блока информации V_n и его удачной распаковки для своевременного удаления пересланных архивов из временной директории источника.

Таким образом, применение мониторинга функционирования вычислительной системы позволяет, в зависимости от ее загрузки динамически изменять объемы передаваемого архива, что приводить к балансировке между загрузкой процессора и максимальной скоростью передачи данных по сети.

Практическая реализация

Для демонстрации работы метода были сформированы файлы конфигурации, отражающие функционирование модели (1). В результате моделирования были построены две схемы передачи архива информации объемом 18 Гб, состоящего из разнородных 18 000 файлов, размер которых варьируется от 280 Мб до 100 Кб. На рис. 1 представлен график копирования файлов без применения метода динамического изменения характеристик копирования.

На рис. 2 представлен график копирования архива при условии использования разработанного метода.

Как видно из рассмотренных выше графиков, время копирования одного и того же объема информации различается практически в два раза. Также исходя из этих графиков видно, что заданный алгоритм практически не успевает выйти на полную скорость передачи информации, поэтому следует сделать вывод, что данный метод будет эффективен при передаче объемов информации более 30 Гб.

Заключение

Хотелось бы отметить, что при создании небольших архивов, процессоры источника и приемника практически не задействованы. Поэтому в качестве дальнейшего направления исследования целесообразно рассмотреть алгоритм, при котором формирование отдельных архивов можно производить с использованием алгоритмов сжатия. Это позволить использовать свободные мощности процессора и сократить объем передаваемой информации, пропорционально выделенной мощности процессоров, готовых архивировать и разархивировать пакеты передаваемой информации.

Список источников

1. Эксперт: объем данных в мире к 2025 году вырастет более чем в пять раз. URL: https://tass.ru/ekonomika/6209822 (дата обращения: 28.12.2022).

2. Данные. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:_Данные (дата обращения: 28.12.2022).

3. *Yildirim E., Arslan E., Kim J.* Application-Level Optimization of Big Data Transfers Through Pipelining, Parallelism and Concurrency // IEEE Transactions on Cloud Computing 4 (1):1–1, 2015.

4. *Jin C., Abramson D., Carroll J.,* Liu. Moving small files in a networked environment // Future Generation Computer Systems. 2023. Vol. 139. P. 167–180.

5. Data transfer between scientific facilities – bottleneck analysis, eaninsights, and optimizations / Y. Liu, Z. Liu, R. Kettimuthu, N. S. Rao et al. // Conference: 2019 19th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGRID), 2019.

6. Cern. FDT, 2022. URL: http://monalisa.cern.ch/FDT/ (дата обращения: 25.12.2022).

УДК 004.89 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-82-85**

С. А. Филист*
доктор технических наук, профессор
А. А. Кузьмин*
кандидат технических наук, доцент
Х. А. Хуссейн Алавси*
аспирант
В. В. Песок*
аспирант
**Юго-Западный государственный университет*

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ КАРДИОРЕСПИРАТОРНОГО СИНХРОНИЗМА

Представлена разработка метода классификации функционального состояния системы дыхания на основе анализа кардиореспираторного синхронизма.
Ключевые слова: *кардиореспираторная система, электромиосигнал, кардиосигнал, вейвлет-преобразование, дескриптор, нейросетевой классификатор.*

S. A. Filist*
Dr. Sc. Tech., Professor
A. A. Kuzmin*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
H. A. Hussain Alawsi*
PhD Student
V. V. Pesok*
PhD Student
**South-West State University*

AUTOMATED SYSTEM FOR QUANTITATIVE INTERPRETATION OF CARDIORESPIRATORY SYNCHRONISM

Development of a method for classifying the functional state of the respiratory system based on the analysis of cardiorespiratory synchronism.
Keywords: *cardiorespiratory system, electromyosignal, cardiosignal, wavelet transform, descriptor, neural network classifier.*

В период распространения коронавирусной инфекции COVID-19 здравоохранение всех стран столкнулось с острой нехваткой медицинских кадровых и материальных ресурсов, что привело к высоким показателям смертности и инвалидизации в результате распространения этого заболевания. Основным осложнением при этом, даже если заболевание прошло бессимптомно, является нарушения функции дыхания, в частности, уменьшение объема легких.

Для восстановления правильного функционирования легких важен реабилитационный процесс, который носит индивидуальный характер и, следовательно, нуждается в мониторинге, так как лечебно-реабилитационные процедуры, которые обычно назначают пациентам при реабилитации функции дыхания, могут не только не способствовать восстановлению, но и нанести вред организму. Однако в настоящее время отсутствуют информационные и технические средства мониторинга восстановления функции дыхания после перенесения заболеваний легких, позволяющие оперативно контролировать процедуру реабилитации и оперативно принимать эффективные управляющие решения.

У пациентов с нарушением функции дыхания сердечно-сосудистые заболевания являются распространенным сопутствующим заболеванием и основной причиной смерти. Взаимодействия сердца и легких можно классифицировать в соответствии с лежащими в их основе родственными, но разными механизмами: дыхательная синусовая аритмия (характеризует

колебания сердечного ритма с ускорением во время фазы вдоха и замедлением во время выдоха), кардиовентиляторная связь (проявляется в том, что при частоте дыхания, обычно превышающей исходный сердечный ритм, сердце усваивает дыхательную ритмику и сокращается с частотой дыхания), и фазовый синхронизм, который определяется как

$$\phi_{n,m} = \left| n\Phi_1 - m\Phi_2 - \delta \right| < \text{const}, \qquad (1)$$

где n и m – целые числа; Φ_1 и Φ_2 – фазы двух осцилляторов. В n:m фазовая синхронизация проявляется как вариация $\phi_{n,m}$ вокруг горизонтального плато [1]–[5].

Кардиореспираторная связь (КРС) – это интуитивное понятие для описания и количественной оценки сложного взаимодействия сердца и легких. Для количественной оценки КРС используются фазовые соотношения, полученные путем анализа сигналов воздушного потока, проходящего через легкие, и сигнала дыхания, выделенного из кардиосигнала [6]. На КРС влияют как заболевания, так и их лечение (профилактика). Поэтому построение автоматизированных систем мониторинга КРС и количественной ее интерпретации является актуальной проблемой.

Метод оценки синхронизма КРС основан на сравнении мощностей спектра ритма дыхания (РД), полученных из поверхностной электромиограммы (ПЭМГ) дыхательных мышц и кардиосигнала. Поскольку и тот, и другой сигналы являются нестационарными, то для исследования их спектральных характеристик было выбрано вейвлет-преобразование [7], [8].

Сигнал ПЭМГ $x(t)$ управляет сокращением мышц грудной клетки, движение которой обеспечивает вентиляцию легких. Так как давление в грудной клетке через обратную связь по барорецепторам модулирует ударный объем и мгновенную частоту сердечных сокращений, то соответствующий сигнал РД может быть извлечен из кардиосигнала $y(t)$ путем определения его спектра Фурье или вейвлет-спектра. Для определения синхронизма КРС используем вейвлет-спектр.

Так как РД представлен в виде цуга гармоник, то показатель синхронности определяется на каждой частоте РД в виде множества точек в координатах

$$\left[W_x(\omega_i, t_j), W_y(\omega_i, t_j) \right], \qquad (2)$$

где $W_x(\omega_i, t_j)$ и $W_y(\omega_i, t_j)$ – значения вейвлет-коэффициентов (действительные или комплексные) ПЭМГ и кардиосигнала, соответственно, на частоте ω_i в момент времени t_j.

Учитывая, что сигнал ПЭМГ сложен для обработки ввиду его зашумленности и хаотичности, то вместо него будем использовать регуляризированный сигнал RMS, определяемый по формуле

$$RMS_m = \sqrt{\frac{1}{n} \Sigma_{k=m-n}^{m} x_k^2}, \qquad (3)$$

где n – число дискретных отсчетов x_k ПЭМГ, которые накапливаются микроконтроллером до текущего отсчета m.

Если ПЭМГ и кардиосигнал оцифровывать синхронно, то на каждой частоте ω_i может быть получено множество (2) для $t_j \in \left[t_1, t_N \right]$, где N – число отсчетов на апертуре наблюдения этих сигналов. На рис. 1 представлены эти два множества для N=32000, полученные при частоте дискретизации этих сигналов 630 Гц. Сигнал ПЭМГ представлен в виде отсчетов RMS, вычисляемых согласно (3).

Посредством выражения (2) можно получить множество векторов на плоскости, положения которых зависит не только от показателя синхронности КРС, но и от особенностей сигналов различных индивидуумов. С учетом того, что процессы, определяющие нестационарность сигналов по времени и по частоте одинаковы как для кардиосигнала, так и для ПЭМГ, отношение их вейвлет-коэффициентов является менее зависимым от помех

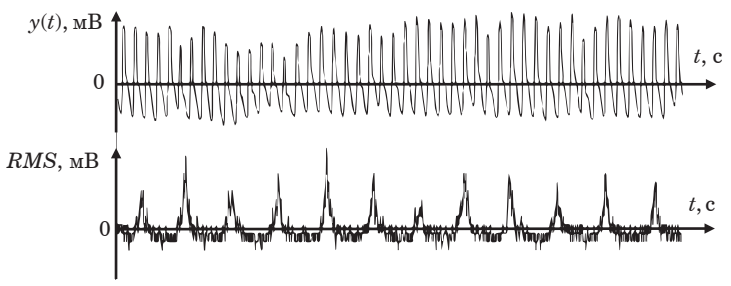


Рис. 1. Отсчеты кардиосигнала (а) и ПЭМГ (б) при N=32000 и частоте дискретизации 630 Гц (кардиосигнал представлен фотоплетизмосигналом, а ПЭМГ – RMS, постоянная составляющая у обоих сигналов удалена)

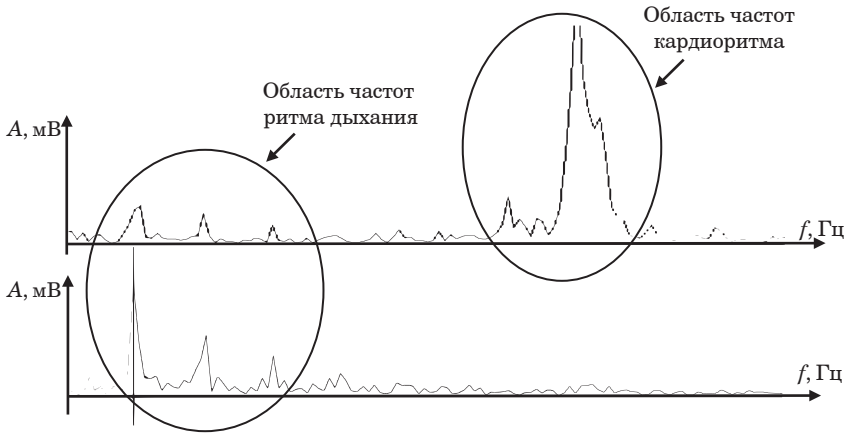


Рис. 2. Спектры Фурье кардиосигнала (вверху) и ПЭМГ – внизу (красный маркер соответствует первой гармоники ритма дыхания – 0,236 Гц)

и более коррелированным с синхронизмом КРС. Поэтому дислокацию этих векторов можем оценить одной скалярной величиной

$$\phi(\omega_i) = \left(\operatorname{arctg}\left(W_y / W_x\right)\right)_{\max} - \\ -\left(\operatorname{arctg}\left(W_y / W_x\right)\right)_{\min}. \quad (4)$$

Определив множество частот

$$\{\omega_i\},\ i = \overline{1, M},$$

где M – число анализируемых частот на вейвлет-плоскости, можем получить вектор информативных признаков (вектор дескрипторов) для обучаемого классификатора показателя синхронизма КРС. Для определения числа анализируемых частот на вейвлет-плоскости, а также их количества предлагается использовать спектры Фурье кардиосигнала и ПЭМГ. На рис. 2 представлены эти спектры, определенные для синхронно оцифрованных сигналов, эпюры которых представлены на рис. 1.

Вместо скалярной оценки дескрипторов согласно (4) можно использовать векторную оценку путем выбора соответствующей статистики для оценки распределения векторов на плоскости. В этом случае необходимо использовать иерархические структуры классификаторов, представленные в [9]–[11].

Для формирования дескрипторов использовался программно-аппаратный комплекс (ПАК). ПАК предназначен для синхронной обработки и анализа двух сигналов: ПЭМГ ($x(t)$) и фотоплетизмограммы ($y(t)$). Если сигнал $y(t)$ поступает непосредственно на модуль вычисления вейвлет-преобразования (ВП), то сигнал $x(t)$ нуждается в предварительной обработке. Сначала он преобразуется согласно формуле (3). Так как это нелинейное преобразование, то после него сигнал пропускается через фильтр нижних частот (ФНЧ) с частотой среза 30 Гц. Затем в дециматоре осуществляется понижение частоты дискретизации ПЭМГ до частоты дискретизации кардиосигнала. Таким образом, вейвлет-плоскость, построенная по ПЭМГ, становится эквивалентной вейвлет-плоскости, построенной по кардиосигналу.

Сигнал $x(t)$ снимался с правой груди по трехэлектродной схеме с нормальным электродом посередине с точек, примерно равноудаленных от сердца. Сигнал $y(t)$ получали посредством датчика пульсоксиметра, подключенного к компьютеру.

На выходах модулей расчета вейвлетов имеем вейвлет-плоскости, примеры которых представлены на рис. 3. Посредством блока Фурье-анализа устанавливаются координаты частот цуга РД, в котором посредством частотных дискриминаторов (ЧД) выбираются M частот для построения формирования дескрипторов в формирователях дескрипторов (ФД).

Каждая частота соответствует строке вейвлет-коэффициентов на вейвлет-плоскости. На ФД поступают пары вейвлет-коэффициентов, с одинаковыми временными и частотными координатами, но взятыми из разных вейвлет-плоскостей. Каждый ФД формирует один дескриптор, интегрирующий фазовые углы по определенной частоте из цуга РД. Количество ФД определяется числом анализируемых частот в цуге РД. В качестве обучаемого классификатора использовалась многослойная нейронная сеть (NET).

Для обучения классификатора NET были созданы экспериментальные группы, в которые были включены студенты Юго-Западного университета с подтвержденным диагнозом ОРВИ. Диагноз ставился на основании сбора анамнеза, выяснения жалоб и внешнего осмо-

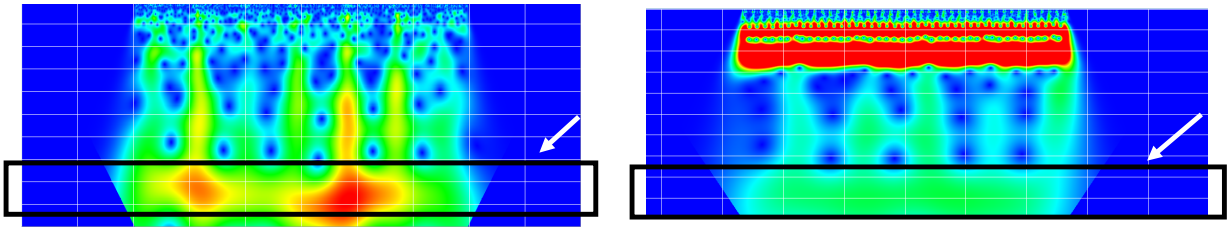


Рис. 3. Вейвлет-плоскость поверхностного электромиосигнала с сегментом ритма дыхания (вверху) и вейвлет-плоскость кардиосигнала того же пациента с сегментами ритма кардиосигнала и ритма дыхания (внизу)

тра. Проведены экспериментальные и статистические исследования автоматизированной системы количественной интерпретации кардиореспираторного синхронизма. Основные статистические показатели качества классификатора системы не были ниже 80 % с доверительными интервалами, не превышающими 5 % от среднего значения, что позволяет рекомендовать его для клинической практики.

Заключение

Разработан метод оценки синхронизма кардиореспираторной системы, основанный на сравнении мощностей спектров ритма дыхания, полученных из поверхностной электромиограммы дыхательных мышц и кардиосигнала. Метод позволяет формировать дескрипторы для обучаемых классификаторов функционального состояния системы дыхания путем оценки распределения векторов, полученных в пространстве вейвлет-коэффициентов поверхностной электромиграммы дыхательных мышц и кардиосигнала, дислоцируемых на вейвлет-плоскостях в области ритма дыхания.

Результаты исследования могут быть использованы для построения интеллектуальных систем медицинского назначения для поддержки принятия решений при дифференциальной диагностике патологий системы дыхания и сердечно-сосудистой системы.

Список источников

1. *Ren Y., Zhang J.* Increased cardiorespiratory synchronization evoked by a breath controller based on heartbeat detection. BioMed Eng OnLine 18, 61 (2019).

2. Изучение сердечно-сосудистого и дыхательного синхронизма при различных режимах дыхания / Л. А. Носкин, А. В. Рубинский, А. П. Романчук и др. // Патогенез. 2018. Т. 16. № 4. С. 90–96.

3. *Флейшман А. Н.* Вариабельность ритма сердца и медленные колебания гемодинамики. Нелинейные феномены в клинической практике. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 194 с.

4. Предикторы синхронности системных ритмов живых систем для классификаторов их функциональных состояний / Т. В. Петрова, С. А. Филист, С. В. Дегтярев и др. // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2018. Т. 17. № 3. С. 693–700.

5. *Баевский Р. М., Берсенева А. П.* Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний. М.: Медицина, 1997. 265 с.

6. *Yu-Chen H.* Cardiorespiratory coupling is associated with exercise capacity in patients with chronic obstructive pulmonary disease // BMC Pulmonary Medicine. 2021. N 21 (1). P. 22 (1–10).

7. Классификация функционального состояния системы дыхания на основе анализа вариабельности медленных волн VLF диапазона / А. В. Киселев, А. А. Кузьмин, М. Б. Мяснянкин и др. // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12. № 1. С. 8–32.

8. Формирование дескрипторов для классификаторов функционального состояния системы дыхания на основе спектрального анализа электрокардиосигнала / М. Б. Мяснянкин, С. А. Филист, А. В. Киселев, А. А. Кузьмин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10. № 3/4. С. 8–28.

9. *Филист С. А., Томакова Р. А.* Универсальные сетевые модели для задач классификации биомедицинских данных // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. Т. 43. № 4 (Ч. 2). С. 44–50.

10. Использование гибридных нейросетевых моделей для многоагентных систем классификации в гетерогенном пространстве информативных признаков / А. Г. Курочкин, В. В. Жилин, С. Е. Суржикова, С. А. Филист // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2015. № 3 (31). С. 85–95.

11. *Филист С. А., Шаталова О. В., Ефремов М. А.* Гибридная нейронная сеть с макрослоями для медицинских приложений // Нейрокомпьютеры. Разработка и применение. 2014. № 6. С. 35–39.

УДК 004.9.62.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-86-91**

С. Г. Фомичева*
кандидат технических наук, профессор
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ ЦЕНТРОВ БЕЗОПАСНОСТИ И СООТВЕТСТВИЯ ТРЕБОВАНИЯМ

Рассмотрены принципы функционирования центров безопасности и соответствия требованиям, выполненных в виде облачных ресурсов и обеспечивающих прозрачность проводимых оценок при анализе систем хранения политик информационной безопасности. Проведен сравнительный анализ функциональности современных центров безопасности и соответствия требованиям.
Ключевые слова: *политика информационной безопасности, центр безопасности и соответствия, мониторинг ресурсов обеспечения безопасности.*

PRINCIPLES OF SECURITY AND COMPLIANCE CENTERS

S. G. Fomicheva*
PhD Sc. Tech., Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

The principles of the functionality of security centers and compliance with requirements, made in the form of cloud resources and ensuring transparency of the assessments carried out in the analysis of information security for policy storage systems, are considered. A comparative analysis of the functionality of modern security centers and compliance with the requirements is carried out
Keywords: *information security policy, security and compliance center, monitoring of security resources.*

Надежность и эффективность работы средств зашиты информации базируется на зрелых политиках информационной безопасности, которые перманентно требуется актуализировать, устанавливать взаимосвязи с конкретными нормативными или организационными средствами контроля бизнес требований. В настоящее время для данных целей в корпоративных системах актуальными становятся программные решения, называемые Центрами безопасности и соответствия требованиям (SCC – *Security and Compliance Center*) [1], [2]. Их использование позволяет доказать, что организация соответствует требованиям управления безопасностью, а также оценить оптимальность конфигурации ресурсов и средств защиты информации (СЗИ) практически в реальном масштабе времени. Кроме того, SCC оснащены богатым инструментарием для просмотра результатов оценки на графических панелях мониторинга (*graphical dashboard*).

Важно, что архитектура SCC должна обеспечить не только открытость с точки зрения дополнения новых политик безопасности и их непротиворечивости, но и прозрачность проводимых оценок независимо от того, что реализована она в виде стационарных или облачных ресурсов [1]–[3]. В данной статье рассмотрены современные подходы к реализации SCC, удовлетворяющих данным требованиям, выполнен сравнительный анализ функциональность существующих SCC и авторского решения.

Механизм SCC в качестве объектов контроля использует средства технической, административной и/или физической защиты, предназначенных для удовлетворения набора определенных требований к безопасности и конфиденциальности. Средства контроля существуют для предотвращения, обнаружения или уменьшения способности угрозы использовать уязвимость. В состав SCC (рис. 1), как правило, входит библиотека управления (*control library*) – набор предопределенных или пользовательских элементов управления и профиль безопасности (*profile*) – группа средств контроля, которые связаны с конкретной целью соблюдения требований.

Основным строительным блоком профиля является элемент управления (*control*). Средства контроля могут представлять собой общие рекомендации, такие как требования безопасности для шифрования данных в режиме ожи-

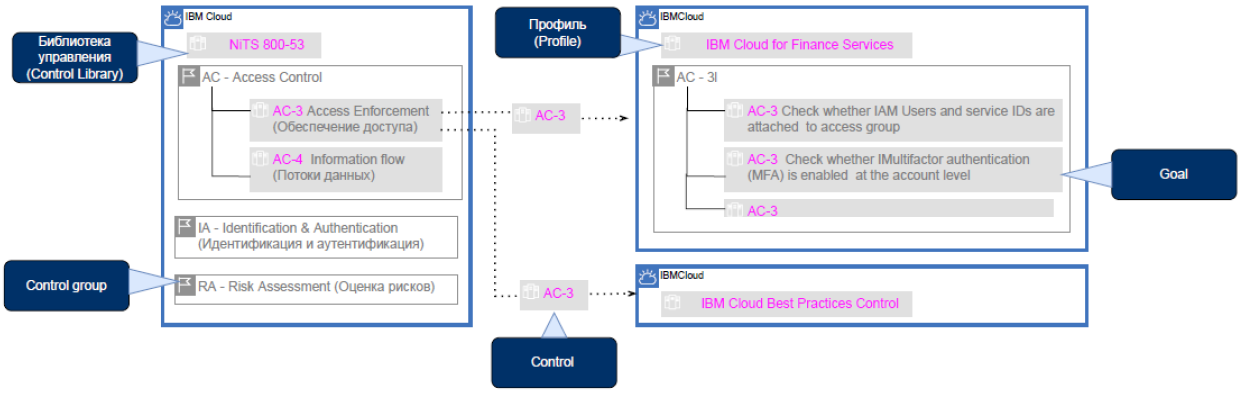


Рис. 1. Структура SCC

дания или предотвращения непривилегированного доступа к конфиденциальным системам. Реализацией элемента управления можно считать выполнение одной или несколько целей безопасности (*Goal*). В Центре безопасности и соответствия цели используются для оценки того, выполняется ли контроль. Для этого SCC сопоставляет цели с внешними нормативными библиотеками элементов управления, которые разделены на семейства (группы – *control group*), используемые для подтверждения соответствия требуемым стандартам. Каждый элемент управления может применяться к одному или нескольким профилям, для полного соответствия каждому элементу управления может потребоваться одна или несколько целей.

Несмотря на то, что профиль в техническом решении очень похож по структуре на библиотеку элементов управления, но в отличие от библиотеки, он может быть присоединен к набору ресурсов и сам быть оцененным. В структуру библиотеки управления и профилей включены спецификации цели (рис. 2) – заявления, определяющее конкретные требования к безопасности и конфиденциальности, которым должен соответствовать элемент управления. Взаимосвязанные между собой через спецификации библиотека управления и профили формируют базу знаний SCC.

Правило базы знаний SCC представляет собой продукцию – набор условных операторов, которые используются для определения соответствия конфигурации ресурса. Каждому параметру правила по умолчанию присваивается значение, которое можно настроить при создании так называемого вложения конфигурации. Вложение формируется путем выбора группы ресурсов, которые требуется оценить, и профиля. Они оцениваются один раз в день или могут быть инициированы по мере необходимости. Фактическая оценка конфигурации на предмет соответствия применимым стандартам может быть как автоматизированной, так и ручной в зависимости от типа элемента управления.

При работе с SCC наиболее распространенными в настоящее время являются два подхода: либо использование API, либо агентный подход [1], [4], [5], основанный на специализированном агенте-коллекторе (*collector-based*). На рис. 2 подробно отображены оба эти пользовательские потоки взаимодействия. В частности, при работе с облачными ресурсами, такими как IBM Cloud Security and Compliance Center, процесс оценки интегрирован с платформой и осуществляется с помощью вызовов API. Если требуется взаимодействие с разно платформенными средами, такими как Amazon Web Services или Microsoft Azure [2], или же используется профиль OSCO (*OpenShift Compliance operator*) [6], то взаимодействие с SCC реализуется с использованием потока на основе коллектора.

Доступ к центру безопасности контролируется *Cloud Identity and Access Management* (IAM) [1]. Каждому пользователю, который обращается к SCC должна быть назначена политика доступа с определенной ролью платформы IAM. Политика определяет, какие действия пользователь может выполнять в контексте Центра безопасности и соответствия требованиям. Политики информационной безопасности позволяют предоставлять доступ на разных уровнях. Некоторые варианты включают в себя доступ:

– к управлению профилями и элементами управления;

– для просмотра состояния безопасности и соответствия требованиям и результатов;

– к управлению уведомлениями о событиях.

В оценках на основе агента-коллектора профиль состоит из целей, которые требуется достичь. Профили, основанные на целях, в насто-

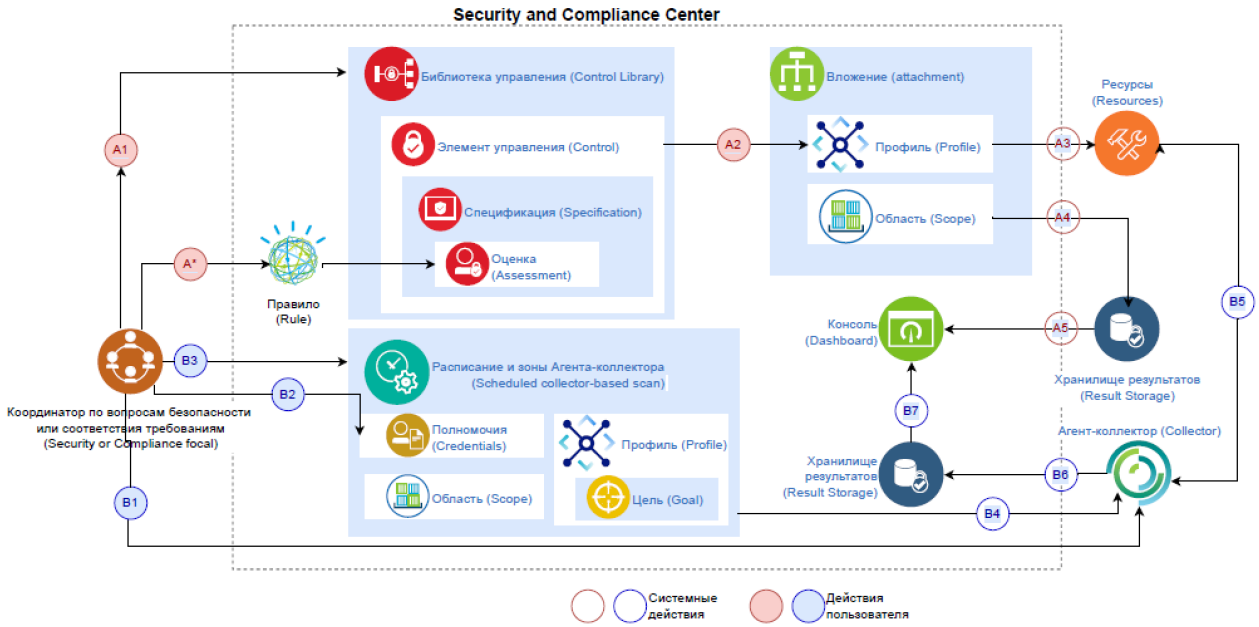


Рис. 2. Потоки взаимодействия с SCC

ящее время используются для оценки гибридных/мультиоблачных сред. Рассмотрим принципы работы SCC.

Пользовательский поток A (*рис. 2*).

Формирование пула правил политик безопасности может быть выполнено на основе предопределенных профилей безопасности и соответствия требованиям, имеющихся в IBM Cloud SCC. Эти базовые профили можно настроить, создав пользовательские правила, добавив или удалив правила, или создав свой собственный профиль на основе каталога элементов управления.

Чтобы начать сканирование ресурсов, далее требуется создать вложение профиля в область ресурсов, которые подлежат сканированию.

После создания вложения ресурсы оцениваются Центром безопасности и соответствия требованиям один раз в день (по умолчанию).

По мере получения результатов оценки, они пересылаются в принадлежащее организации хранилище облачных объектов.

Результаты отображаются на панели мониторинга Центра безопасности и соответствия требованиям.

Пользовательский поток B (*рис. 2*).

Чтобы начать работу координатора по вопросам безопасности или соответствия требованиям, первоначально требуется создать и развернуть агент-коллектор в инфраструктуре, которая имеет сетевое подключение к анализируемым ресурсам.

Чтобы коллектор мог прочитать данные конфигурации ресурса, требуется предоставить учетные данные с соответствующим уровнем доступа.

Далее определяется область набора сканируемых ресурсов, а затем планируется расписание их сканирования.

Агент-коллектор следит за соблюдением требований.

Агент-коллектор оценивает ресурсы.

По завершении сканирования результаты пересылаются в базу данных, принадлежащую Центру безопасности и соответствия требованиям.

Результаты отображаются в консоли SCC на странице результатов гибридного облака

Сравнение функциональности SCC представлено в табл. 1.

Здесь следует отметить, что ограничение использования зарубежных SCC (в силу настоящей политической ситуации в мире), заставляет переходить к доработке существующих российских программных решений. В частности, автором данной работы предлагается решение на базе платформы Yandex Cloud, характеристики которого также отражены в табл. 1. Кроме того, в отличие от существующих, предлагаемое автором решение позволяет при формировании баз знаний SCC, являющихся ядром Пользовательских оценок (*Custom assessments*), использовать не только механизмы фиксации правил базы знаний, созданных вручную экспертами по безопасности, но и использовать принципы объясняемого искусственного интеллекта (XAI) для автоматического формирова-

Таблица 1

Сравнение функциональности центров безопасности и соответствия требованиям

№ п/п	Функциональность	IBM Cloud	Yandex Cloud (авторский проект)	Collector-based
1	Доступность (Availability)	IBM Cloud	Yandex Cloud	IBM Cloud, Amazon Web Services, Google Cloud Platform, Microsoft Azure, and On-premises
2	Интеграция (Integrations)	-	OSCO	Tanium and OSCO
3	Поддержка корпоративных учетных записей (Enterprise account support)	Доступно по умолчанию	Доступно по умолчанию	Требуется настройка
4	Установка (Setup)	Интегрирован с IBM Cloud – Требуется создать вложение, чтобы начать оценку	Интегрирован с Yndex Cloud – Требуется создать вложение, чтобы начать оценку	Требуется настройка коллекторов и учетных данных
5	Хранение результатов (Results storage)	Хранилище, принадлежащее клиенту	Хранилище, принадлежащее клиенту (организации)	IBM-owned
6	Параметры управления (Control parameters)	Настраиваются с помощью вложения	Настраиваются с помощью вложения	Настраиваются по учетной записи
7	Пользовательские оценки (Custom assessments)	Имеется конструктор для формирования простых декларативных правил	Используется продукционная база знаний (правила продукций). Имеется XAI-механизм автоматического формирования гипотез правил базы знаний	-
8	Управление версиями (Versioning)	Поддерживается для элементов управления и профилей	Требуется создать новый профиль или элемент управления	Требуется создать новый профиль или элемент управления
9	Поиск (Search)	Возможность поиска и фильтрации элементов управления и результатов по компоненту, области применения, категории и статусу	Возможность поиска и фильтрации элементов управления и результатов по компоненту,	Доступен поиск по имени элемента управления

ния гипотез правил базы знаний SCC. Их реализация описана автором в работах [5], [7].

Во всех представленных в табл. 1. решениях SCC формирует область сканирования ресурсов в соответствии с учетными записями и определяет ее при создании вложения путем выбора родительской учетной записи или группы ресурсов, которые подлежат оценке. В результате оценивается все, что существует в пределах этой учетной записи или группы. Так, например, если создается вложение на уровне предприятия, то все группы учетных записей и учетные записи внутри них включаются в данную оценку. Если нет необходимости оценивать конкретную учетную запись, то всегда можно исключить ее из своей области при создании вложения. Когда учетная запись исключается, любая из ее дочерних учетных записей или групп также исключается (рис. 3). Однако по мере добавления новых учетных записей они автоматически оцениваются в соответствии с вложением родительских учетных записей.

Прокомментируем области сканирования в соответствии с примером на рис. 3.

Вложение A. Целевой областью вложения A является все предприятие. Как можно видеть, оцениваются все группы учетных записей и учетные записи, существующие в рамках предприятия (если только они не были намеренно исключены).

Вложение B. Целевой областью вложения B является конкретная группа учетных записей внутри предприятия. Как можно видеть, ресурсы в группе учетных записей теперь оцениваются по профилю, выбранному во вложении A, и оцениваются в соответствии с профилем, выбранным при создании вложения B.

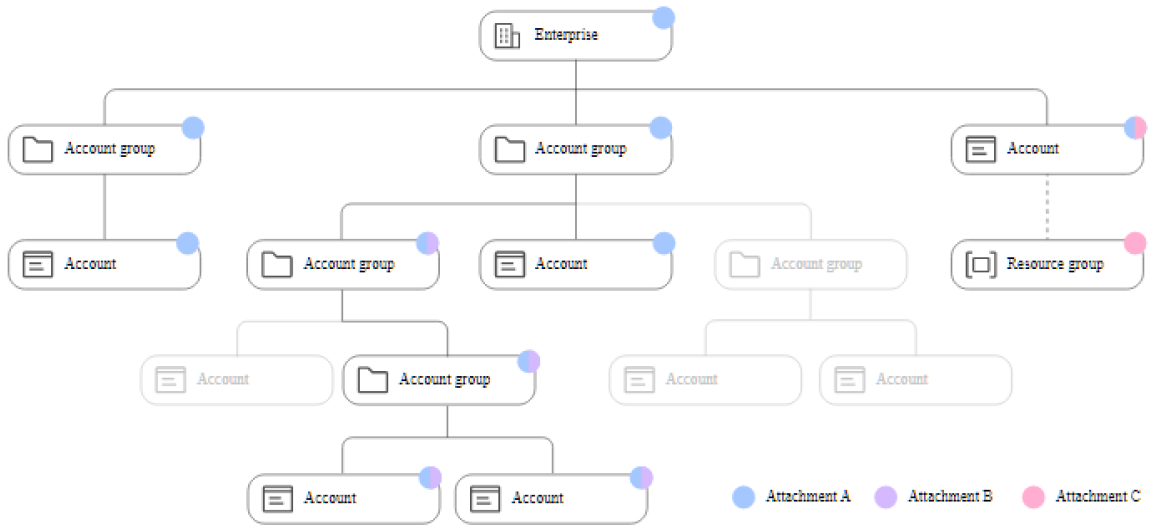


Рис. 3. Иерархия вложений профилей SCC

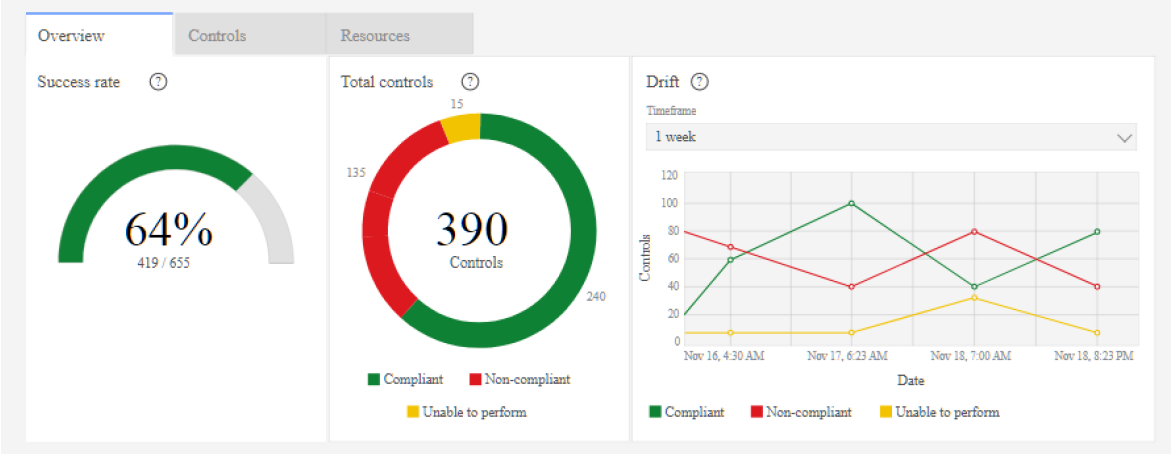


Рис. 4. Пример визуализации результатов SCC

Вложение C. Целевой областью вложения C является индивидуальная учетная запись. Это вложение было создано в учетной записи вне контекста предприятия. Как можно видеть, учетная запись теперь оценивается по профилю, который был выбран во вложении A, но группы ресурсов внутри учетной записи оцениваются только по профилю, который был выбран при создании вложения C.

Результаты оценки (рис. 4) помещаются в учетную запись, в которой было создано вложение. Для примера из рис. 3 результаты вложений A и B существовали бы в корпоративной учетной записи. Однако результаты приложения C будут существовать в отдельной учетной записи.

На рис. 4 показатель успешности (*Success rate*) означает скорость, с которой анализируемые конфигурации проходят оценку. Общее количество элементов управления (*Total controls*) – общее количество элементов управления, которые были оценены во время этого сканирования. Дрейф (*Drift*) – разница в результатах за выбранный период оценки.

В заключение следует выделить функциональность по обеспечению безопасного управления данными при использовании SCC. При оценке конфигурации ресурса SCC собирает информацию [1], [5] о конфигурации из целевой среды. Собранные данные включают свойства и конфигурации поддерживаемых служб, сетевых объектов, узлов, баз данных, платформ Kubernetes и виртуальных машин. При этом вся связь между агентом-коллектором и службой зашифрована по протоколу TLS 1.2+ и подписана открытым ключом. Весь трафик передается через общедоступный Интернет с помощью облачного Интернет-сервиса с завершением TLS, защитой от DDoS и брандмауэром веб-приложений (WAF). Чтобы прочитать конфигурации ресурсов, коллектор использует учетные

данные, которые связаны с ним через пользовательский интерфейс SCC. Уровень доступа, назначенный учетным данным совпадает с уровнем доступа, который коллектор имеет к ресурсу. Учетные данные, которые предоставляются службе, надежно хранятся – они не доступны в виде открытого текста пока хранятся или используются сервисом. Тем не менее при работе в гибридном облачном потоке, можно добавить более высокий уровень контроля шифрования к своим данным в состоянии покоя (когда они хранятся), включив интеграцию с IBM Key Protect или Hyper Protect Crypto Services. Hyper Protect Crypto Services – это служба управления ключами, которая поддерживается сертифицированной аппаратной моделью безопасности уровня 4 FIPS 140-2 (HSM). Использование SCC, с одной стороны, позволяет существенно снизить время принятия решений при аудите систем информационной безопасности, а с другой – обеспечить надежность хранения такой чувствительной информации, как политики информационной безопасности.

Список источников

1. Центр безопасности и соответствия требованиям. URL: https://cloud.ibm.com/docs/security-compliance?topic=security-compliance-scopes&interface=ui (дата обращения: 14.12.2022).

2. Introducing the new Microsoft 365 security center and Microsoft 365 compliance center &. URL: https://techcommunity.microsoft.com/t5/security-compliance-and-identity/introducing-the-new-microsoft-365-security-center-and-microsoft/ba-p/326959 (дата обращения: 14.12.2022).

3. *Фомичева С. Г.* Функциональные особенности SIEM-решений нового поколения // Завалишинские чтения 21. XVI Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике. СПб.: ГУАП, 2021. С. 327–333.

4. *Беззатеев С. В., Фомичева С. Г., Супрун А. Ф.* Повышение эффективности мультиагентных систем информационной безопасности методами постквантовой криптографии // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2022. № 4. С. 71–88.

5. *Фомичева С. Г.* Теоретические аспекты квантования баз знаний в мультиагентных системах // Информационно-управляющие системы. 2017.

6. Compliance Operator and Compliance in ACS. URL: https://redhat-scholars.github.io/acs-workshop/acs-workshop/08-compliance.html (дата обращения: 14.12.2022).

7. *Fomicheva S., Bezzateev S.* Modification of the Berlekamp-Massey algorithm for explicable knowledge extraction by SIEM-agents. 2022 J. Phys.: Conf. Ser. 2373 052033.

УДК 004.9.62.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-92-95**

С. Г. Фомичева*
кандидат технических наук, профессор
Е. Г. Шумков*
студент
Д. А. Курушин*
студент
И. С. Михеев*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМ ИНВЕНТАРИЗАЦИИ И МОНИТОРИНГА ИНФОРМАЦИОННЫХ АКТИВОВ С СИСТЕМАМИ ИДЕНТИФИКАЦИИ И АДМИНИСТРИРОВАНИЯ

Приведены результаты анализа функциональности систем. инвентаризации и мониторинга информационных активов с системами управления идентификацией и администрирования в контексте обеспечения бесшовной интеграции и обеспечения информационной безопасности.
Ключевые слова: *бесшовная интеграция, система инвентаризации и мониторинга, система идентификации и администрирования.*

S. G. Fomicheva*
PhD Sc. Tech., Professor
E. G. Shumkov*
Student
D. A. Kurushin*
Student
I. S. Mikheev*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ANALYSIS OF MECHANISMS FOR INTEGRATING INVENTOTY AND MONITORING SYSTEMS OF INFORMATION ASSETS WITH IDENTIFICATION & ADMINISTRATION SYSTEMS

The results of the analysis for the systems functionality are presented. inventory and monitoring of information assets with identification management and administration systems in the context of ensuring seamless integration and information security.
Keywords: *seamless integration, inventory and monitoring system, identification and administration system.*

Современные распределенные архитектуры данных в корпоративных информационных системах базируются на концепции тканей данных (*Data Fabric*), которая служит для агрегации ресурсов данных из различных сегментов IT-инфраструктуры организации и оптимизирует тем самым процессы управления данными и интеграции [1]–[3]. Переход на практике к использованию технологий Data Fabric в российских организациях в силу исторически сложившихся техник является нетривиальной задачей и зачастую требует разработки вспомогательных слоев предобработки корпоративных данных. Это требует, с одной стороны, создания новых и/или реорганизации существующих правил бизнес-логики, а с другой – проработки дополнительных правил политики информационной безопасности и их сквозной реализации.

В данной статье рассматриваются проблемы, существующие инструменты и предлагаются авторские подходы к решению задачи бесшовной интеграции корпоративных систем инвентаризации и систем аутентификации пользователей в рамках крупной энергетической компании.

Прежде всего, следует отметить, что без средств автоматизации провести инвентариза-

цию информационных активов и выявить в них несовпадения либо явные нарушения на сегодняшний день практически невозможно [2]. Под информационными активами в данном случае подразумеваются сведения о всех существующих учетных записях пользователей и выставленных у них прав доступа, о выданных внешних носителях, в том числе предназначенных для хранения ключей ЭЦП и конфиденциальной информации, сведений о соглашениях о конфиденциальности, о проведенных инструктажах по направлению ИБ, а также о произошедших инцидентах информационной безопасности. Также к таким сведениям можно отнести реестры сетеобразующего оборудования и рабочих станций с контролем выставленных на них конфигурационных настроек, установленного ПО, технических характеристик. Конечный список таких активов определяется, как правило, лицами, принимающими решения, топ-менеджмента организации при взаимодействии с корпоративным центром информационной безопасности (SOC). Кроме того, бесшовная интеграция должна обеспечивать эффективный функционал для учета нормативно-правовой документации, связанной с деятельностью корпоративных подразделений, включая отдела (центр) информационной безопасности. Это является элементом комплаенс-контроля.

Сделав в данной работе акцент на систему инвентаризации и мониторинга информационных активов организации, выделим базовый функционал, обеспечение которого следует обеспечить:

– мониторинг сетевой активности и формирование инфокоммуникационной карты сети;

– инвентаризация и отслеживание изменений учетных записей пользователей (в том числе – *Active Directory* (AD)), включая сведения на рабочих станциях (*End Points*);

– формирование электронных учетных реестров информационных активов и отслеживание дат лицензионного истечения;

– создание дашбордов и отчетов для аналитиков;

– отслеживание событий информационной безопасности, в том числе лог-записей, сохранение их в лог-журналах и отправка в специализированном формате в агентные SIEM-системы [2], [3].

Авторами данной статьи проведен анализ существующих систем инвентаризации и мониторинга информационных активов организаций, выделены их специфические особенности, обозначены преимущества и недостатки в соответствии с рассматриваемым контактом. Результаты сравнительного анализа представлены в табл. 1. Как видно из табл. 1, ни в одной из

Таблица 1

Сравнительный анализ систем инвентаризации и мониторинга информационных активов

Критерии	10-Страйк	Total Network Inventory 5	Spice-Works Inventory	Lansweeper	Network Inventory Advisor	Solarwinds Network Inventory	EMCO Network Inventory
Страна (Производитель)	РФ (10-Strike Software)	РФ (Soft-inventive Lab)	США (Spice-works)	Бельгия (Hemoko Software)	США (ClearA-pps)	РФ (Gals Software)	Исландия (EMCO Software)
Настраиваемый экспорт данных	–	–	–	–	–	–	–
Сканирование AD	–	–	+	+	–	+	–
Сканирование устройств всех типов	+	+	+	+	+	+	–
Активная служба поддержки ПО	+	+	–	+	+	+	+
Платное ПО	+	+	–	+	+	+	+
Открытый исходный код	–	–	–	–	–	–	–
Построение карты сети	–	+	+	–	–	+	–
Удаленное сканирование устройств	+	+	+	+	+	+	+
Установление ролей и разграничение прав доступа	–	–	–	–	–	–	–
Работа по расписанию	+	+	–	–	–	+	+
Ведение складского учета	+	–	–	–	–	+	+
Отслеживание изменений конфигураций	+	+	–	–	+	–	+
Аудит лицензий	+	+	–	–	+	–	+
Формирование отчетной документации	+	+	–	+	+	–	+
Дружественный интерфейс	–	+	+	–	–	+	–

Таблица 2

Сравнительный анализ функциональности ICA-систем

Критерии	Symantec IGA	IBM Security IGI	ForgeRock Identity Governance	One Identity IGA Suite	Oracle Identity Governance
Страна (Производитель)	США (Broadcom, Inc.)	США (IBM, Inc.)	США (ForgeRoc, Inc.)	США (Quest Software)	США (Oracle, Inc.)
Полное управление жизненным циклом удостоверений	–	+	–	+	+
Синхронизация с Active Directory	+	+	+	+	+
Интеграция с другими системами	–	–	+	–	+
Возможность развертывания в локальной среде	+	+	+	+	+
Сертификация доступа пользователей	+	+	+	+	+
Быстрое развертывание	+	–	–	–	+
Гибкость масштабирования	+	–	–	–	+
Инструменты для анализа ролей	–	+	+	+	+
Инструменты для анализа рисков	+	+	–	+	–
Отечественный производитель	–	–	–	–	–
Поддержка	+	+	+	+	+

рассматриваемых систем не поддерживается функционал по установлению ролей и разграничения прав доступа, для чего требуется подключение внешних сервисов или систем, таких как IGA (Identity Governance & Administration) [4]. Особо отметим, что коннекторов для такого подключения не предусмотрено. Предполагая наличие подобных коннекторов непосредственно в IGA-системах авторами проведен анализ функциональности существующих на текущий момент систем управления идентификацией и администрирования.

IGA-системы предлагают ряд полезных функций, в том числе: сквозное управление жизненным циклом пользователя. Это снижает потребность в ручном вводе учетных данных; сертификацию доступа для обеспечения гибких и мощных рабочих процессов, которые позволяют пользователям легко повторно сертифицировать доступ; и мощную аналитику удостоверений, упрощающую определение областей риска и обеспечивающая лучшую видимость и контроль доступа пользователей для анализа и моделирования ролей. Результаты сравнительного анализа функциональности существующих IGA-систем представлены в табл. 2. Анализируя табл. 2, можно заметить, что при всех несомненных достоинствах упомянутые выше IGA-системы обладают одним существенным недостатком – зарубежным производством. В текущей политической ситуации в мире это означает, что существует возможность прекращения поддержки клиентов из РФ и ограничение им доступа к критически важному программному обеспечению. Следовательно, мы не можем получить гарантий стабильной работы рассматриваемых продуктов на долгосрочный период. Это приводит к необходимости в проектировании прототипов IGA-инструментов в качестве подготовки контура для внедрения подобной системы в будущем.

Помимо этого, и большинство самих систем инвентаризации и мониторинга также имеют иностранное происхождение и не могут использоваться в рамках импортозамещения.

В качестве выводов зафиксируем, что в системах инвентаризации и мониторинга практически полностью отсутствует настраиваемый экспорт данных: предлагаемое формирование отчетов в формате .doc или .pdf малоэффективно в контексте бесшовной интеграции. Стоит отметить, что сканирование Active Directory является одним из основных проприетарных требований к системе такой энергетический компании, как Газпром-транснефть. В связи с большим количеством пользователей вычислительной сети отслеживать все вносимые изменения в данные AD вручную невозможно, а рассмотренные программные продукты не обладают соответствующими механизмами мониторинга пользовательских действий. Это также является дополнительным обоснованием для реализации собственного решения с подобными инструментами. Отметим, что не во всех рассмотренных системах присутствует функционал «работа по расписанию», хотя современная система должна уметь работать «в фоне» и выявлять текущие изменения.

Таким образом, можно заключить, что современные системы инвентаризации и мониторин-

га являются актуальными для выполнения задач своего класса, но не поддерживают механизмов бесшовной интеграции с системами управления идентификацией и администрирования. На основании вышесказанного принимается решение о создании собственных механизмов интеграции подобных систем с поддержкой функций управления информационной безопасностью на базе агентных SIEM-решений.

Список источников

1. 10 лучших программ для инвентаризации сети 2022. URL: https://www.softinventive.ru/best-network-inventory-tools/ (дата обращения: 04.12.2022).

2. *Фомичева С. Г.* Функциональные особенности SIEM-решений нового поколения // Завалишинские чтения '21. XVI Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике. СПб.:ГУАП, 2021. С. 327–333.

3. *Фомичева С. Г.* Моделирование мобильных агентов в киберфизических системах // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: сб. статей XXIII междунар. научной конф. СПб.: ГУАП, 2020. С. 368–374.

4. *Губка О.* Эволюция систем IGA (Identity Governance and Administration). URL: https://www.anti-malware.ru/analytics/Technology_Analysis/IGA-Identity-Governance-Administration (дата обращения: 04.12.2022).

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА

УДК 62-503.56 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-96-98**

Н. Л. Гречкин*
ассистент
Е. Ю. Ватаева*
старший преподаватель
Д. В. Шишлаков*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ЛИНЕЙНЫХ САУ ОБОБЩЕННЫМ МЕТОДОМ ГАЛЁРКИНА

Рассматривается вопрос, связанный с синтезом линейных САУ. В качестве математического аппарата применяется обобщенный метод Галеркина. Результаты синтеза приводятся.
Ключевые слова: *линейные САУ, обобщенный метод Галеркина, синтез.*

N. L. Grechkin*
Assistant
E. Y. Vataeva*
Senior Lecturer
D. V. Shishlakov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

SOLVING THE PROBLEM OF SYNTHESIZING LINEAR ACS BY THE GENERALIZED GALERKIN METHOD

In this paper, the issue related to the synthesis of linear ACS is considered. The generalized Galerkin method is used as a mathematical apparatus. The results of the synthesis are given.
Keywords: *linear ACS, generalized Galerkin method, synthesis.*

В теории управлении сложными динамическими системами ни один из регуляторов не пользовался таким успехом, как ПИД-регулятор. Известно, что более 85 % систем автоматического управления имеют в своем составе данный регулятор. На сегодняшний день существует большое число различных методик разработки ПИД-регулятора.

Задачи, связанные с проектированием и настройкой пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регуляторов, на первый взгляд кажутся простыми и понятными, но на практике оказываются сложными задачами, если необходимо достичь нескольких (и часто противоречащих друг другу) целей, таких как быстрые переходные процессы и высокая стабильность. Простейшим примером системы автоматического управления с ПИД-регулятором является система температурного контроля воды. Если в системе отсутствует ПИД-регулятор, то для поддержания постоянной температуры воды, выходящей из котла, оператору необходимо следить за датчиком температуры и, соответственно, при необходимости регулировать клапан. В случае если температура воды достигает высоких значений, оператору нужно закрывать клапан, если же наблюдается обратная ситуация, температура становится низкой, то оператору надо открывать клапан. Если в данной системе присутствует ПИД-регулятор, то он автоматически поддерживает температуру воды путем правильного положения клапана. Поэтому синтез ПИД-регулятора является актуальной задачей современной теории управления.

В качестве математического аппарата в данной задаче предлагается использовать обоб-

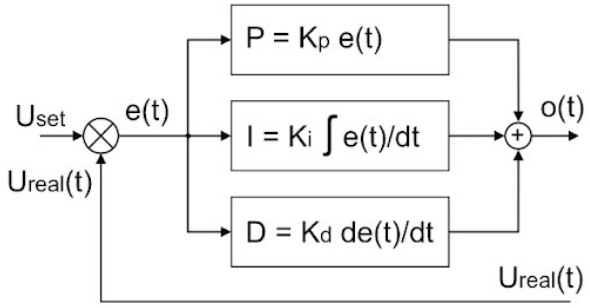


Рис. 1. Структурная схема ПИД-регулятора

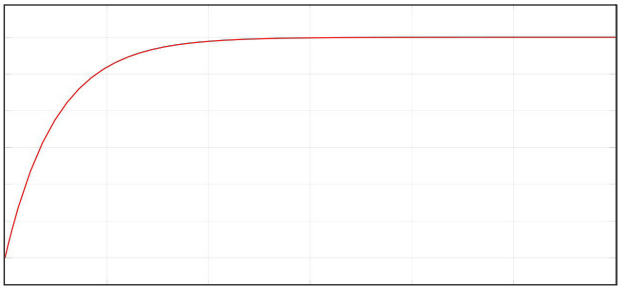


Рис. 3. Желаемый процесс

щенный метод Галеркина. Данный подход позволяет решать задачу синтеза законов управления для САУ различных классов (импульсные, непрерывные, нестационарный САУ и т. п.). Динамика таких систем может описываться как линейными, так и нелинейными дифференциальными уравнениями произвольного порядка [1].

Задача синтеза рассматривается в предположении, что структура синтезируемой САУ и параметры объекта управления известны. Также накладываются ограничения на значения варьируемых параметров исходя из условия их технической реализуемости

$$c_k^- \le c_k \le c_k^+, \; k = 1,2,\ldots,m,$$

где c_k+ и c_k- – максимально и минимально допустимые значения варьируемых параметров соответственно.

Ограничения на грубость системы по варьируемым параметрам характеризуются выражением

$$\Delta = \frac{\delta c_k}{c_k} \le \Delta^0,$$

где Δ – заданное значение грубости системы; δc_k – вариации параметров, в пределах которых обеспечивается устойчивость системы; c_k – искомые параметры оператора управления.

Рассмотрим следящую систему, модель которой представлена на рис. 2. Необходимо подобрать коэффициенты ПИД-регулятора [2] для обеспечения следующих показателей качества переходного процесса на выходе регулятора напряжения, заданного передаточной функцией

$$\frac{0.5}{0.1s+1}, \; T_{П.П.} \le 0,2 \text{ с}, \; \sigma \le 1\%.$$

Дифференциальное уравнение, которое описывает движение системы, имеет вид

$$x_0 = \left(1 + \left(\frac{k_i + k_d s^2 + k_p s}{s}\right) \cdot \frac{6}{(s+7)(0,1s+1)}\right) = f(t) \cdot \frac{0.5}{0.1s+1}.$$

Выбранному программному движению, представленному на рис. 3, соответствует следующее выражение

$$x_0 = \left(0.6 - 0.6e^{-20t}\right)1(t).$$

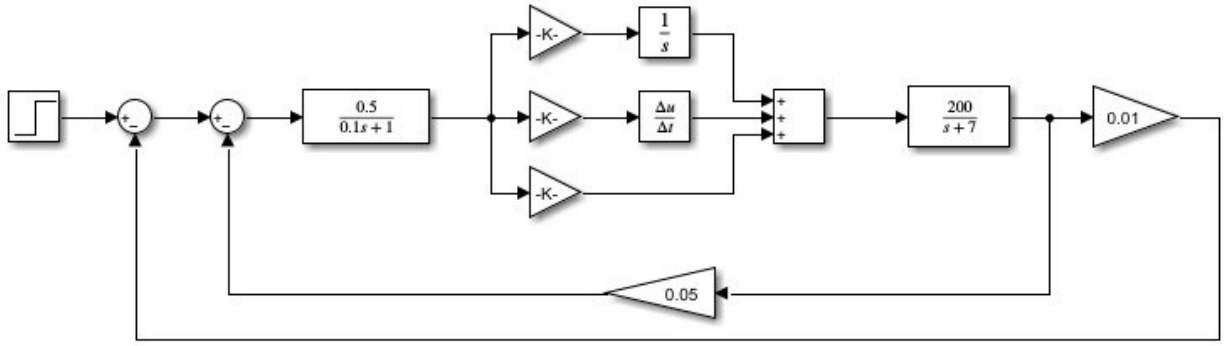


Рис. 2. Структурная схема следящей системы

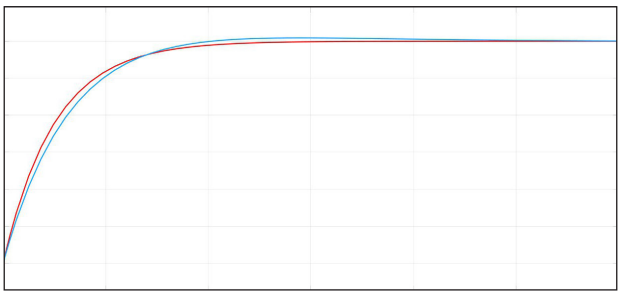


Рис. 4. Сравнение сигналов

После того как задано желаемое программное движение формируется невязка

$$\psi(c_k, D) = Q(c_k, D)x_0(t) - S(c_k, D)f(t),$$

где D – оператор обобщенного дифференцирования.

Искомые параметры c_k определяются из условий ортогональности невязки (4) координатным функциям

$$\int_0^\infty \psi(c_k, t)\varphi_q(t)dt = 0; k, q = 1,2,\ldots,m,$$

где $\varphi_q(t)$ – система из m непрерывно дифференцируемых линейно независимых координатных функций $\varphi_1(t), \varphi_2(t), \ldots, \varphi_q(t), \ldots, \varphi_m(t)$.

Подставляя значение желаемого программного движения в уравнение движения САУ и решая уравнение, получаем следующую систему из m линейных алгебраическихуравнений

$$\sum_{i=0}^{h} a_i(c_k)A_{qi} - \sum_{i=0}^{v} e_i(c_k)C_{qi} = 0,$$
$$q = 1,2,\ldots m,$$

где

$$A_{qi} = \int_0^\infty D^i\left\{x^0(t)\right\}e^{-\rho_q t}dt = A_q\rho_q^{i-1},\ i = 0,1,\ldots,h;$$

$$C_{qi} = \int_0^\infty D^i\left\{f(t)\right\}e^{-\rho_q t}dt = C_q\rho_q^{i-1},\ i = 0,1,\ldots,v.$$

При $x^0(t) = \left(H_0 - H_0 e^{-\alpha t}\cos\beta t\right)1(t)$ интегралы A_{qi} будут вычисляться по формулам

$$A_{qi} = \int_0^\infty D^i\left\{\left(H_0 - H_0 e^{-\alpha t}\cos\beta t\right)1(t)\right\}e^{-\rho_q t}dt = A_q\rho_q^{i-1},$$

$$i=0,1,\ldots,n;\ q=0,1,\ldots,m,$$

где $A_q = \dfrac{H_0\left[\alpha\left(\alpha+\rho_q\right)+\beta^2\right]}{\left(\alpha+\rho_q\right)^2+\beta^2}$.

$$C_{qv} = \int_0^\infty D^v\left\{1(t)\right\}e^{-\rho_q t}dt = \rho_q^{v-1},$$

$$v=0,1,\ldots,v;\ q=0,1,\ldots,m.$$

В результате получаем следующую систему

$$\begin{cases} f_1 = (288k_i)/41 + (72k_d)/41 + (144k_p)/41 - 2{,}89, \\ f_2 = (124k_i)/7 + (24k_d)/7 + (24k_p)/7 - 2{,}97, \\ f_3 = (18k_i)/11 + (72k_d)/11 + (36k_p)/11 - 3{,}10. \end{cases}$$

Задача синтеза параметров обобщенным методом Галеркина в вычислительном плане представляет собой задачу нелинейного программирования с целевой функцией, построенной на основе уравнений, оптимум которой определяется путем использования метода поиска экстремума функционала

$$J = \sum_{q=1}^{m}\left\{\int_0^\infty \psi(c_k, t)\varphi(t)dt\right\}^2, \min_{c_k} J \to 0.$$

В результате минимизации функции были найдены следующие коэффициенты ПИД-регулятора: k_i=0, k_d=0.0846, k_p=0.7812.

При значения найденных коэффициентов, значение функции J=1.4672*10^{-5}.

На рис. 4 представлено сравнение переходного процесса на выходе регулятора напряжения и программного движения. Как видно из рис. 4, при использовании найденных коэффициентов переходный процесс в системе соответствует заданным показателям качества.

Подводя итог, была решена задача синтеза линейной САУ обобщенным методом Галеркина. Были получены следующие коэффициенты k_i=0, k_d=0.0846, k_p=0.7812. Была продемонстрирована легкость и простота использования обобщенного метода Галеркина при решении задачи синтеза коэффициентов ПИД-регулятора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, "Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга".

Список источников

1. *Шишлаков В. Ф., Шишлаков А. В., Тимофеев С. С.* Синтез САУ при различных видах аппроксимации нелинейных характеристик: теория и практика: монография. СПб.: ГУАП, 2017. 151 с.

2. *Дьяконов В. П.* MATLAB 7.*/R2006/R2007: Самоучитель: самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2009. 768 с.

УДК 621.396 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-99-105**

Д. В. Куцулим*
магистрант
А. В. Выграновская*
магистрант
А. Р. Худайбердина
магистрант
С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
В. Е. Белай*
ассистент
А. В. Рысин*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УЧЕБНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ

Описан процесс создания учебной роботизированной ячейки, которая включает в себя промышленный манипулятор KUKA KR 10 RT100-2, два конвейера и толкатель с базой под детали.
Ключевые слова: *учебная роботизированная ячейка, конвейерная линия, фланец для захвата, робототехническая система.*

D. V. Kutsulim*
Postgraduate Student
A. V. Vygranovskaya*
Postgraduate Student
A. R. Khudayberdina*
Postgraduate Student
S. V. Solyonyj*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
V. E. Belay*
Assistant
A. V. Rysin*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DESIGNING A ROBOTICS TRAINING CELL

This paper will describe the process of creating a training robotic cell, which includes an industrial manipulator KUKA KR 10 RT100-2, two conveyors and a pusher with a base for parts.
Keywords: *training robotic cell, conveyor line, gripper flange, robotic system.*

Введение

Робототехническая система – это любая производственная система, в которой используется один или несколько промышленных роботов. Робототехнические комплексы могут иметь различные размеры и сложность: узлы, детали, линии роботов. Следовательно, сложность и масштаб технического процесса возрастают: ячейки роботов объединяются в части роботов, а части роботов – формируют роботизированные линии для производства роботов (заводы, фабрики и т. д.).

Основной задачей является реализация учебной роботизированной ячейки уже с имеющимся манипулятором KUKA, создание автоматизированной конвейерной линии, имеющий в своем арсенале три отсека для разных видов грузов (деталей), отсекатели, разного рода датчики для определения породы детали, а также базы, на которой расположены сами детали, толкатель для них, перемещающий детали из базы на конвейерную ленту более простого назначения.

Технологический процесс учебной роботизированной ячейки

Исследуемый технологический процесс заключается в подаче заготовки к покрасочной камере посредством перемещения на конвейере, перемещением роботом заготовки в камеру, выгрузки детали из покрасочной камеры и установка на второй конвейер с последующей сортировкой по цвету. Для автоматизации производственного процесса необходимо спроектировать подающие конвейеры, написать программы для конвейеров и запрограммировать промышленного робота. Масса детали составляет 500 грамм, объем производства 100 заготовок в час. Для распознавания цвета используется датчик линии.

На роботе установлен электрический захват без обратной связи по усилию сжатия. Для этого захвата необходимо спроектировать фланец, позволяющий быстро сменять захват и не добавляющий вес. Подача заготовок на первый конвейер будет осуществляться с помощью подачи толкателем. После определения цветом, сортировка детали производится с помощью отсекателя.

Условия эксплуатации:

– от –10 до +40 C^0 в помещении с умеренной влажностью;

– степень защиты IP22;

– источник питания блок постоянного напряжения 12 В.

Расчет нагрузок

Расчет нагрузок начинается с исходных данных. В нашем случае по конвейеру будут перемещаться изделия весом 500 грамм, со скоростью 0,2 м/с. Точность поддержания скорости 1 %. Одновременно на конвейере могут быть до 4 изделий.

Параметры питающей сети постоянного тока:

– напряжение U_c=12,6 В;

– допустимое отклонение напряжения ±10 %.

Допустимый коэффициент перегрузки двигателя по моменту, $k_{пер=}$1,5.

Мощность электродвигателя при подъеме груза определяем по формуле 1

$$P_д = F_H \cdot \upsilon_{и.о} = \frac{mg\upsilon_{и.о}}{\eta}, \quad (1)$$

где $F_н$ – сила тяжести груза; η – КПД кинематической схемы ЭП.

На первом этапе проектирования необходимо задаться КПД кинематической схемы ЭП. Определим эквивалентный момент инерции ЭП по формуле 2

$$\eta_P \approx 0,85 - 0,95;$$

$$F_H = mg = 4 \cdot 0,5 \cdot 0,98 = 19,6\,\text{Н}; \quad (2)$$

$$P_д = 19,6 \cdot \frac{0,2}{0,9} = 4,36\ \text{Вт}.$$

Выбираем электродвигатель TETRIX MAX с номинальной мощностью 3 Вт, скоростью вращения 100 об\мин (10,5 рад/с).

Приведенный к валу двигателя момент сопротивления нагрузки по формуле 3

$$M_C = \frac{4 \cdot 0,5 \cdot 0,98 \cdot 0,2}{10,4 \cdot 0,9} = 0,42\ \text{Нм}. \quad (3)$$

Выбранный двигатель имеет номинальный момент 4,9 Нм.

Выбор компонентов

На начальном этапе создания нужно подобрать электронные компоненты, которые будут использоваться в данном проекте.

Основным компонентом для наших конвейеров служит двигатель постоянного тока, отвечающий за движение конвейерной ленты. В нашем случае это TORQUENADO серии TETRIX MAX. Это двигатель постоянного тока, имеющий вольтаж в 12 В, частота вращения составляет 100 об/мин, крутящий момент составляет 4,9 Нм. Отличительной особенностью данного двигателя является встроенный энкодер, что позволяет ему намного точнее регулировать угол поворота.

Сердцем нашего конвейер служит плата Arduino Nano, построенная на микроконтроллере ATmega328 (Arduino Nano 3.0) или ATmega168 (Arduino Nano 2.x), имеет небольшие размеры и может использоваться в различных разработках.

Она имеет схожую с Arduino Duemilanove функциональность, однако отличается сборкой. Отличие заключается в отсутствии силового разъема постоянного тока и работе через кабель Mini-B USB.

Для второго конвейера используем плату Arduino Uno. Arduino Uno контроллер построен на ATmega328. Платформа имеет 14 цифровых вход/выходов (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ), 6 аналоговых входов, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и кнопку перезагрузки. Для работы необходимо подключить

платформу к компьютеру посредством кабеля USB либо подать питание при помощи адаптера AC/DC или батареи.

В отличие от всех предыдущих плат, использовавших FTDI USB микроконтроллер для связи по USB, новый Ардуино Uno использует микроконтроллер ATmega8U2.

Управления двигателем осуществляется с использованием специализированного драйвера L298N. Данный драйвер используется для управления двигателем постоянного тока. Имеет в своем арсенале два H-моста, что позволяет ему подключать пару двигателей постоянного тока. С помощью данного драйвера можно менять скорость ДПТ, а также его направление вращения.

Для охлаждения был выбран бесщеточный вентилятор постоянного тока на 12 В.

Также для отсекателей основного конвейера понадобятся сервоприводы типа MG995. Рабочее напряжение этой сервомашинки составляет от 4,8 до 7,2 В. Угол поворота равен 120 градусам, что идеально подходит для отсекателей. Усиление составляет 8,5–10 кг/см в зависимости от рабочего напряжения.

Еще понадобится больший по габаритам сервопривод, HITEC серии HS-755MG. Отличием данного сервопривода от прошлых является его усиление, которое составляет от 12 до 14 кг/см, а также угол поворота равен 360 градусам. Так же данный сервопривод имеет двойной подшипник на валу. Этот серводвигатель будет использован для создания толкателя в отсеке для деталей.

Для определения типа груза, расположенном на конвейерной линии, будут использоваться специальные датчики.

В качестве датчика наличия предмета будут использованы инфракрасные датчики YL-63 (FC-51). Характеристики данного датчика таковы: напряжения питания составляет от 3 до 5 В, диапазон действия составляет от 2 до 30 см, угол обнаружения препятствий составляет 35 градусов. Принцип его работы заключается в том, что он получает сигнал через ИК-приемник, а дальность определения объектов зависит от материала из которого сделано препятствие.

Также понадобится датчик индуктивности. Предназначен для измерения перемещения объекта в пределах от 1 мкм до 20 мм. Такие датчики можно применить для измерения уровня жидкости, различного рода веществ, давления и разных сил. Возьмем для нашего проекта ВБИ-М12-39В-2121-Л. Диапазон рабочего напряжения составляет от 10 до 30 В, расстояние срабатывания составляет 4 мм, гарантированный интервал срабатывания составляет 0–3,2 мм.

Проектирование конвейерной линии

Проектирование данной конвейерной линии начали с основной конвейерной базы, состоящей из уже раннее использованной боковой стенки, металлической балки, на которой впоследствии будут располагаться отсекатели и крепление для ДПТ, и днища. Все элементы держаться за счет специальных угловых деталей.

Для данной конвейерной базы были сделаны специальные ножки, которые можно прикрепить к ячейке с промышленным роботом. Состоят они из металлической плашки, а за счет уголков можно прикрепить их к поверхности нашей ячейки.

Следующим этапом будет размещение роликов на конвейерной базе. Благодаря специальным втулкам крепится ось между боковых стенок конвейера, предварительно поместив наши ролики между двух стенок. На конце основного ведущего ролика с одной стороны крепим шестеренку, которая будет служить для передачи движения ролику. Каждый конец вала закреплен с помощью зажимных шайб.

На боковую балку крепятся двигатель постоянного тока, который служит для движения конвейерной линии и два сервопривода, служащие для приведения отсекателей в действие. Двигатель крепиться за счет специального крепления, состоящего из двух частей, соединенных между собой твумя болтами. Также на вал двигателя крепится шестеренка, двигатель ставиться перпендикулярно валу с роликом и соединяеття двумя шестеренками, таким образом осуществляется движение конвейерной ленты. Для крепления севромоторов использовались специальные пластины.

Дополнительные дорожки для конвейера были спроектированны и вырезаны на лазерном станке из листа фанеры. Крепятся они к боковой стенки конвейера за счет двух отверстий на задней части.

Последними элементами для данного конвейера будут отсекатели и ограничители для них. Два отсекателя буду крепиться к сервоприводам, а один к самой балке, так как приводить его в действия значения не имеет. Хоть и выбранные сервоприводы имеют определенный угол поворота, ставим небольшие ограничители, состоящие из шестигранного профиля с резьбой под винт, для обеспечения точного

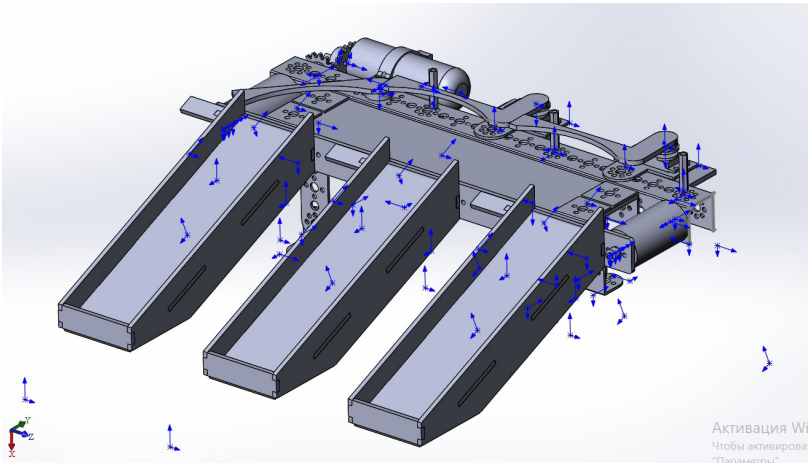


Рис. 1. Общий вид конвейерной линии

угла поворота сервопривода. Отсекатели также вырезаем из листа фанеры на лазерном станке. Все отсекатели расположены на разной по уровню высоте, чтобы между ними не происходило столкновений, Последний отсекатель крепится к балке и дердиться на зажимной шайбе. Еще вырезаем из листа фанеры крепления для датчиков.

В итоге получаем сборку конвейерной линии (рис. 1).

Проектирование толкателя и базы с деталями

Еще одним элементом учебной ячейки служит хранилиже деталей и толкатель дня них. Задача заключается в том, что в хранилище расположены определенного вида детали, толкатель нужен для того, чтобы перемещать детали с хранилища на конвейерную линию № 1, а уже с конвейерной ленты промышленный манипулятор перемещает детали на конвейерную линию № 2. Механизм данного толкателя достаточно прост: имеется профиль, внутри которого расположена ребристая рейка. Сама рейка соединяется профилем, а на профиле есть шестерня, которая соприкасается с рейкой. Движение происходит за счет сервопривода, который соединен с валом нашего профиля с помощью шестеренок.

Для данной конструкции были использованы уже готовые металлические элементы, а само хранилище вырезано на лазерном ЧПУ станке.

Первым делом собираем основу толкателя с основным профилем, скобой для сервопривода и креплением под ячейку.

Дальше собираем движущий механизм. Состоит он из вала, закрепленном на двух соединительных шайбах, а посередине закреплена небольшая шестерня. Также крепим направляющие элементы для движущейся рейки, котрая и будет двигать предметы.

Далее крепим движущуюся рейку. На концах рейки крепим болты, чтобы она не имела возможности вылетить с направляющеих деталей.

Крепим сервопривод к нашей конструкции и ставим две шестеренки, одну на сервопривод, другую на вал.

Вырезаем на лазерном станке стенки хранилища для деталей, соединяем их и крепим к ним

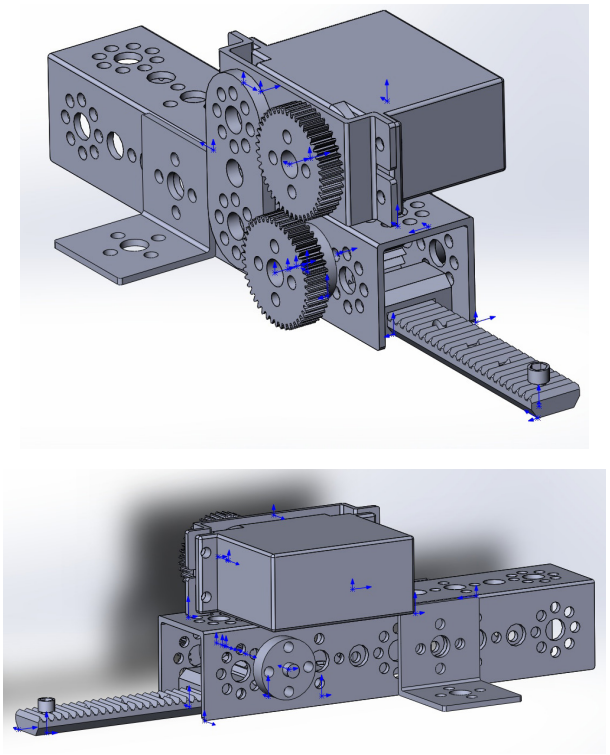


Рис. 2. Модель готового толкателя (две стороны)

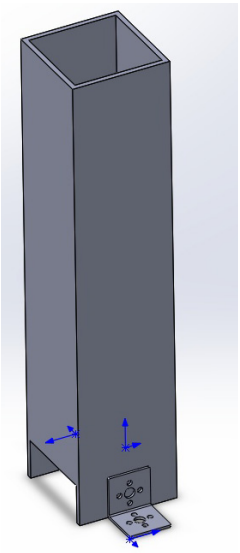


Рис. 3. Хранилище деталей

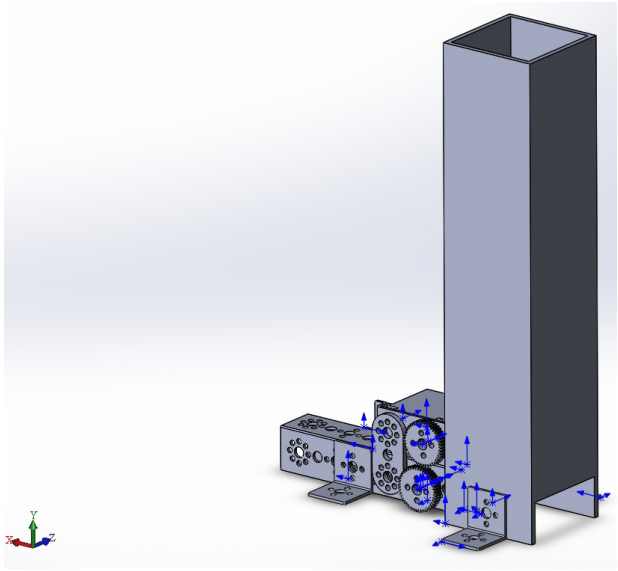


Рис. 4. Общий вид толкателя с хранилищем деталей

уголки, чтобы в дальнейшем закрепить конструкцию в ячейку [10].

Крепим наш толкатель вместе с хранилищем.

Проектирование фланца для захвата

Для крепления захвата к промышленному панипулятору был спроектирова специальный фланец. Сам фланец состоит из двух частей. Одна часть крепится на манипулятор, другая на захват. После присоединения захват крепиться на манипулятор и держится за счет специального паза и четырех болтов. Данный фланец напечатан на 3D-принтере.

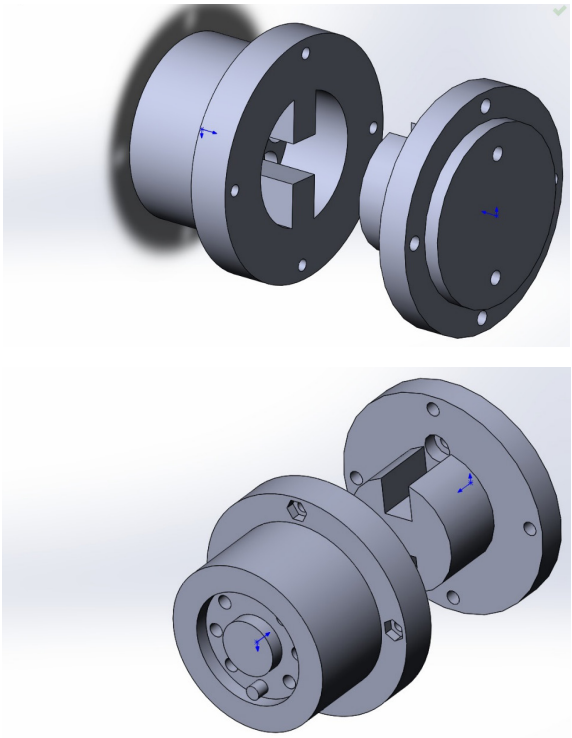


Рис. 5. Общий вид фланца

Общий вид учебной роботизированной ячейки

Расстановка всех объектов происходит на специальную ячейку. Общий вид учебной роботизированной ячейки представлен на рис. 6, выполненном в программе Microsoft Visio 2016.

Блок-схема

Задача данной учебной роботизированной ячейки – перенос небольших деталей (груза)

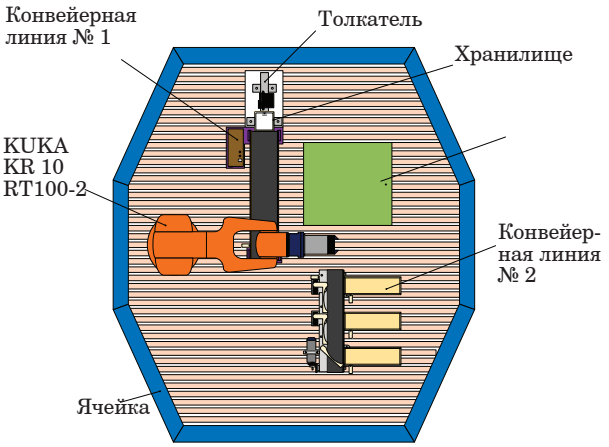


Рис. 6. Общий вид промышленной роботизированной ячейки

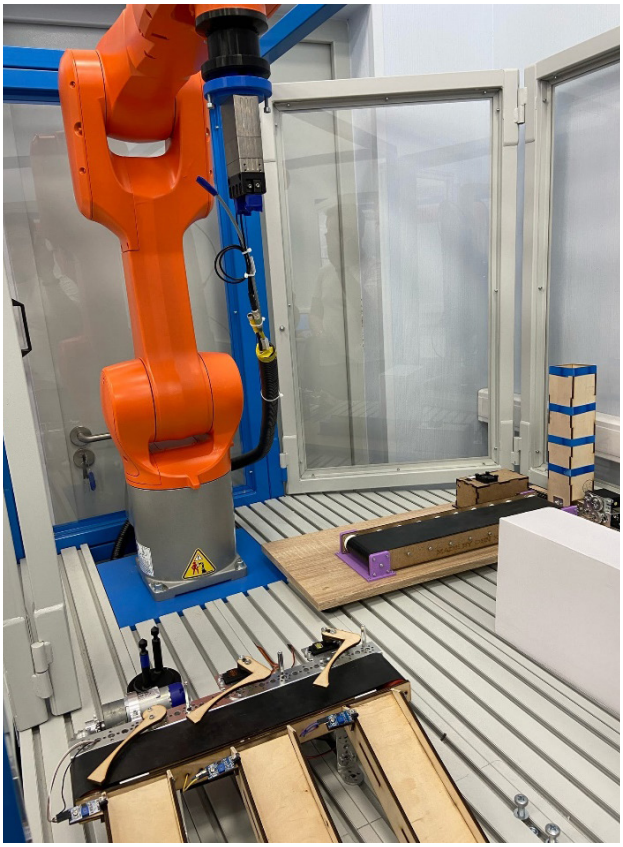


Рис. 7. Общий вид промышленной роботизированной ячейки (фотография)

при помощи манипулятора, сортировка этой детали на конвейерной линии. На рис. 8 представлена блок схема одного из процессов, который осуществляет данная ячейка.

Суть данной блок схемы заключается в следующем: подающий механизм выталкивает деталь на конвейерную линию № 1, деталь доходит до конца конвейера, срабатывает датчик наличия, конвейер останавливается, промышленный манипулятор начинает свое движение, доходит до детали, захват сжимает деталь, происходит перенос детали в покрасочную камеру, манипулятор становится в удобное положение, происходит покраска детали, манипулятор подходит к детали, захват сжимается, происходит перенос детали на конвейерную линию № 2, робот возвращается в домашнее положение, деталь доходит до распределителей, отсекатель направляет деталь в нужный отсек.

Заключение

В процессе написания данной статьи была поставлена задача: реализовать проект промышленной роботизированной ячейки. В арсенале уже имелся готовый промышленный манипулятор фирмы KUKA, проект включал в себя создание с нуля дополнительных элементов, таких как две конвейерной линии, имеющие разное назначение, и толкатель с хранилищем под детали.

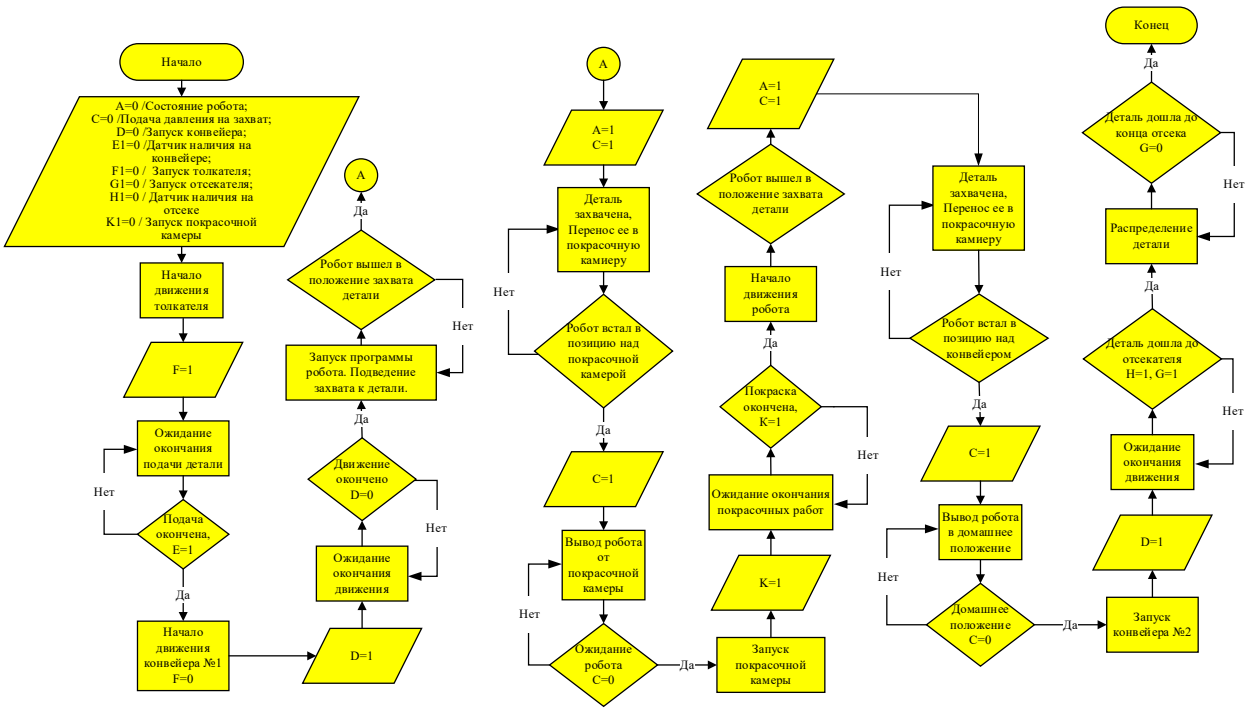


Рис. 8. Блок-схема

Список источников

1. Роботизированные комплексы (роботизированные ячейки). URL: https://www.robomatic.ru/content/robotizirovannye-kompleksy-robotizirovannye-yacheyki (дата обращения: 30.05.2022).

2. Роботизированные ячейки и комплексы, этапы проектирвания РТК. URL: https://ru-ecology.info/post/100669102380019/ (дата обращения: 16.05.2022).

3. Роботизированные системы. Виды. Этапы внедрения на производстве. URL: https://alfamatic.ru/info/articles/upravlenie-proizvodstvom/robotizirovannye-sistemy-vidy-etapy-vnedreniya-na-proizvodstve/ (дата обращения: 16.05.2022).

4. *Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю., Костюков В. А.* Проектирование роботов и робототехнических систем: учеб. пособие. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2014. 196 с.

5. *Зеленский О. В., Петров А. С.* Справочник по проектированию ленточных конвейеров. М.: Недра, 1986. 223 с.

УДК 621.391 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-106-111**

А. А. Мартынов*
кандидат технических наук, доцент
О. Б. Чернышева*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСОВ ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС

Рассмотрены вопросы использования Интернет-ресурсов для внедрения цифровых технологий в образовательный процесс. Приведены примеры формирования фонда тестовых заданий.
Ключевые слова: *Интернет-технологии, фонд оценочных знаний, тестовый контроль.*

A. A. Martynov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
O. B. Chernysheva*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

USE OF INTERNET RESOURCES FOR THE INTRODUCTION OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN THE EDUCATIONAL PROCESS

The issues of using Internet resources for the introduction of digital technologies in the educational process are considered. Examples of the formation of the fund of test tasks are given.
Keywords: *Internet technologies, evaluation knowledge fund, test control.*

Введение

Вопрос внедрения цифровых технологий в образовательный процесс в настоящее время как никогда актуален. Образовательный процесс должен быть построен так, чтобы за время обучения студенты практически освоили цифровые технологии, применяемые в отраслях, для которых осуществляется их подготовка. Для эффективного решения этой задачи при обучении студентов необходимо использовать цифровые технологии. В первую очередь это относится к использованию цифровых технологий в дистанционных формах обучения и самообучения, а также при осуществлении контроля знаний, включая и текущий контроль знаний.

Задачами текущего контроля знаний являются повышение качества знаний обучающихся, приобретение и развитие навыков самостоятельной работы, повышение академической активности обучающихся. Одной из эффективных форм текущего контроля знаний является тестовый контроль, который может быть использован как для аттестации уровня текущей успеваемости студентов, так и для самоконтроля и самообучения студента. Формы и виды текущего контроля знаний определяются государственным образовательным стандартом и рабочими программами учебных дисциплин.

Методика проведения контроля знаний должна стимулировать у обучающихся стремление к систематической самостоятельной работе по изучению учебной дисциплины. Для совершенствования и повышения эффективности методики контроля знаний необходимо применение и развитие цифровых технологий в образовательном процессе.

Процедура формирования банка тестовых заданий

В современных условиях образовательный рынок подвержен стремительным изменениям, формируются новые требования к скорости обучения, его качеству и формату образовательных продуктов. Одним их таких направлений является внедрение в образовательный процесс тестирования знаний студентов с использованием цифровых технологий.

При использовании любой цифровой платформы для проведения тестового контроля знаний студентов основой является банк вопросов с ключами правильных ответов. Количество тестовых вопросов, возможные варианты ответов и форма их представления формируются преподавателем на этапе создания теста. Назначение тестового контроля также определяется преподавателем – текущий контроль знаний, промежуточная аттестация или закрепление знаний по текущему лекционному материалу.

Цифровые технологии проведения тестового контроля знаний позволяют не только автоматизировать процедуру измерения уровня знаний и умений обучающихся, но и реализовать процесс самообучения студента. Для реализации тестового контроля знаний необходимо по каждой учебной дисциплине составить фонд тестовых заданий. Тест может состоять из небольшого количества несложных задач, предоставлять возможность выбора из перечня ответов, а также занимать часть учебного занятия.

Фонд тестовых заданий целесообразно разделить по контролируемым разделам (модулям), прописанным в рабочей программе дисциплины, и сопроводить перечнем учебно-методической литературы, необходимой для самостоятельного изучения заданной темы.

Рассмотрим процедуру формирования фонда тестовых заданий на примере дисциплины «Промышленная электроника». Курс «Промышленная электроника» включает в себя такие основные разделы, такие как выпрямители, автономные инверторы напряжения и тока, резонансные инверторы, преобразователи частоты со звеном и без звена постоянного тока, а также различные типы импульсных преобразователей постоянного тока. Эти преобразователи являются основой функционирования современного электротехнического и электроэнергетического оборудования, поэтому знание принципов их работы, основных характеристик и способов проектирования способствуют повышению уровня конкурентоспособности будущих выпускников на рынке труда.

Банк тестовых заданий целесообразно разделить на модули в соответствии с разделами дисциплины, при этом возможно объединение нескольких разделов в одни тестовый модуль. Учитывая, что общая трудоемкость дисциплины составляет 252 часа (7 ЗЕ) и изучается в течение двух семестров, должны быть сформированы четыре обязательных для прохождения тестовых модуля: два модуля (по одному в каждом семестре) – для проведения текущего контроля знаний студентов и два модуля – для проведения промежуточной аттестации. Для планомерной подготовки студентов и получения ими взаимосвязанных знаний в течение семестра необходимо сформировать небольшие тестовые задания по изучаемым темам с организацией обратной связи со студентами. Обратная связь способствует формированию статистической информации об активности студентов в течение семестра и позволяет преподавателю анализировать уровень освоения ими изучаемых тем.

Большинство современных цифровых платформ имеют удобный интерфейс и большой набор цифровых инструментов для создания тестов: выбор одного или нескольких ответов в тексте, в выпадающем списке, ввод правильного ответа в текстовом или цифровом формате, задания на перетаскивания.

Примеры создания тестовых заданий в среде LMS

В ГУАП разработана электронная информационно-образовательная среда LMS, ориентированная на взаимодействие преподавателя и студентов в рамках образовательного процесса [1]. Система позволяет не только проводить вебинары через встроенную систему видеоконференций, размещать учебные материалы и ссылки на электронные ресурсы, но и осуществлять текущий контроль знаний с помощью опросов и тестирования. Безусловно, при организации тестового контроля знаний необходимо в первую очередь использовать LMS, поскольку и студенты, и преподаватели ГУАП имеют доступ к системе и дополнительных настроек не требуется.

Цифровой инструментарий LMS позволяет создавать разнообразные тесты, имеет возможности для их оперативного редактирования и отслеживания результатов тестирования в виде таблиц и графической интерпретации данных, что очень удобно для преподавателя.

В осеннем семестре 20/23 учебного года для 6 учебных групп общей численностью 105 человек была проведена промежуточная аттестация в формате тестирования. Из сформированного банка, состоящего из 80 вопросов, каждому студенту случайным образом предлагалось ответить на 15 вопросов с ограничением по времени и количеством попыток. За каждый правильный ответ студенту начислялся один балл. Пример одного тестового вопроса в системе LMS показан на рис. 1.

В целом, студенты успешно справились с предложенным тестом, что подтверждается полученными результатами. В табл. 1 пред-

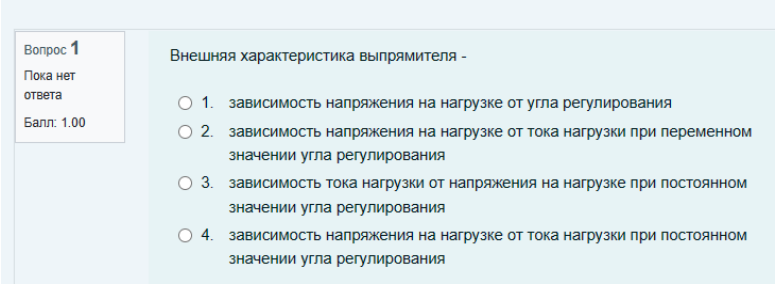


Рис. 1. Пример тестового вопроса в системе LMS

Таблица 1

Результаты тестирования

Среднее по группе 3026 Кс	11.88
Среднее по группе 3014	14.00
Среднее по группе 3015	12.72
Среднее по группе 3021	13.55
Среднее по группе 3023	13.25
Среднее по группе 3026	14.18
Общее среднее	**13.17**

Источник: Оценки: Просмотр (guap.ru)

Элемент оценивания	Рассчитанный вес	Оценка	Диапазон	Проценты	Отзыв	Вклад в итог курса
Промышленная электроника						
Тест	40.00 %	8.00	0–10	80.00 %		32.00 %
Промежуточная аттестация по курсу «Промышленная электроника»	60.00 %	14.00	0–15	93.33 %		56.00 %
Итоговая оценка за курс Простое среднее взвешенное оценок.	-	**88.00**	**0–100**	**88.00 %**		-

Рис. 2. Статистика тестирования отдельного студента в системе LMS

ставлены средние баллы результатов тестирования по группам по итогам ответов на 15 вопросов. В случае если по результатам тестирования студент получает оценку «неудовлетворительно», то ему необходимо еще раз изучить лекционный материал, дополнив его рекомендованной учебно-методической литературой. Ко второй попытке прохождения теста студент может быть допущен не ранее, чем через 24 часа.

Информационно-образовательная среда LMS имеет инструмент, позволяющий оценить не только уровень полученных знаний группы, но и уровень каждого студента в отдельности. На рис. 2 показан фрагмент статистического отчета по конкретному студенту, в котором отражены результаты тестирований, проводимых в течение семестра – общее количество вопросов, количество правильных ответов с автоматическим формированием итоговой оценки за курс.

Также преподаватель имеет возможность просмотреть вопросы, полученные студентом во время тестирования, статистику ответов и время, затраченное на тестирование. Фрагмент такого отчета представлен на рис. 3.

Таким образом, система LMS ГУАП включает в себя необходимый набор инструментов не только для организации тестового контроля знаний, но и для всестороннего анализа полученных результатов.

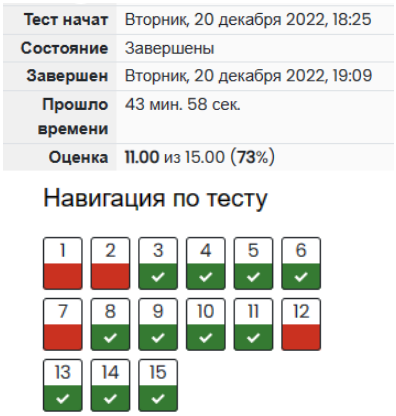


Рис. 3. Фрагмент статистических данных по отдельному студенту

Конструктор тестовых вопросов Яндекс. Формы

На практике часто возникает необходимость проведения оперативного контроля знаний, например, для самооценки студентов по лекционному материалу или лабораторной работе. Для этих целей наиболее удобной является Яндекс. Формы – цифровая платформа, обладающая легким и удобным интерфейсом, позволяющим достаточно быстро создавать тестовые задания и различные опросы и не требующая специальных знаний по программированию. Платформа имеет [2]:

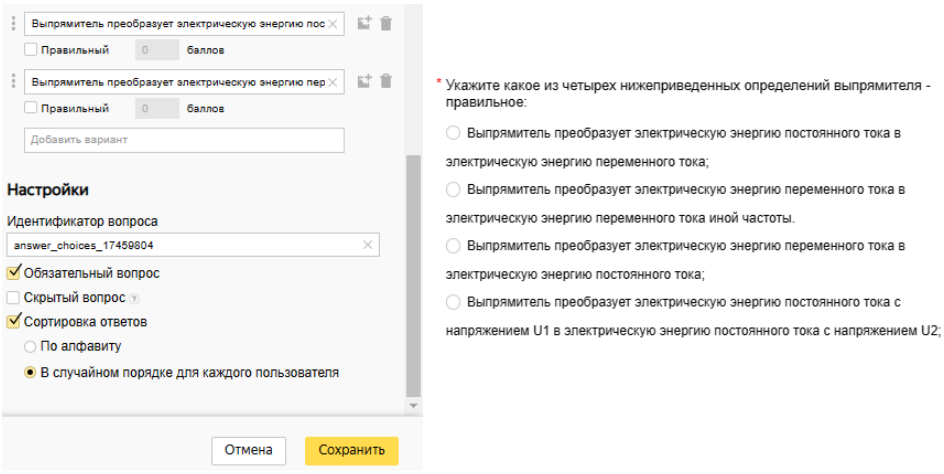


Рис. 4. Конструктор вопросов в Яндекс. Формы

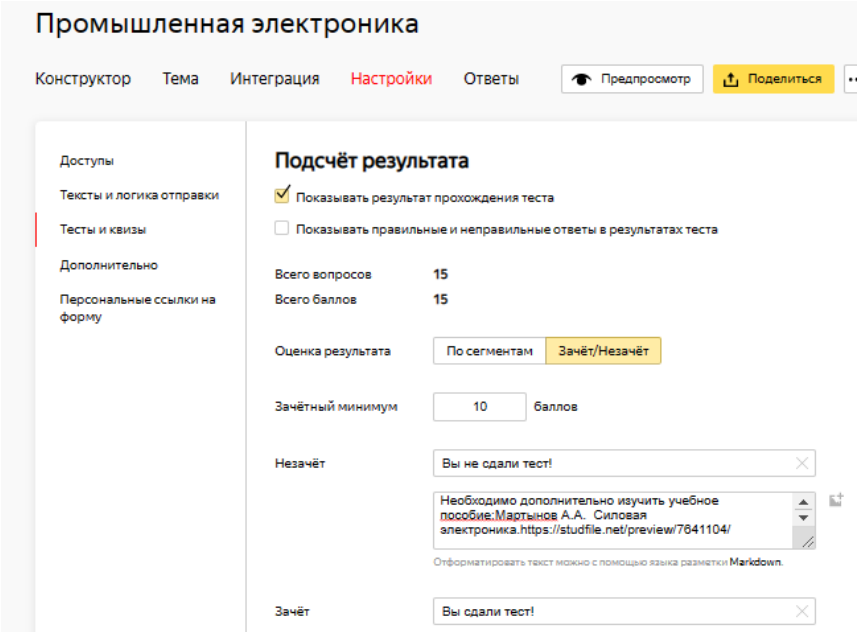


Рис. 5. Блок настройки в Яндекс. Формы

– конструктор, предназначенный для формирования тестовых вопросов и вариантов ответа (рис. 4);

– тему, позволяющую создавать фоновые оформления;

– интеграцию, предназначенную для настройки действий, которые будут автоматически выполняться после заполнения формы;

– настройки дополнительных инструментов для удобного прохождения теста и формирования статистики ответов (рис. 5);

– ответы, позволяющие скачать статистику ответов в форматах XLSX, CSV или JSON с использованием фильтра по датам.

Пример сформированного вопроса с вариантами ответов представлен на рис. 6.

Как отмечалось ранее, важным элементом тестового контроля знаний является анализ

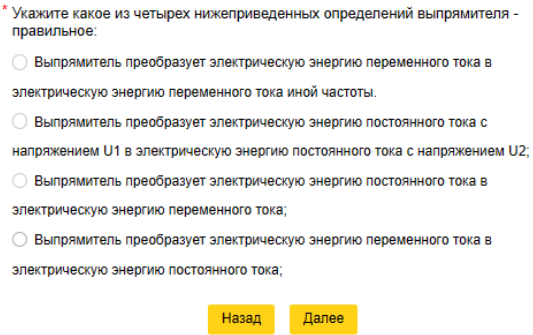


Рис. 6. Тестовый вопрос на экране монитора

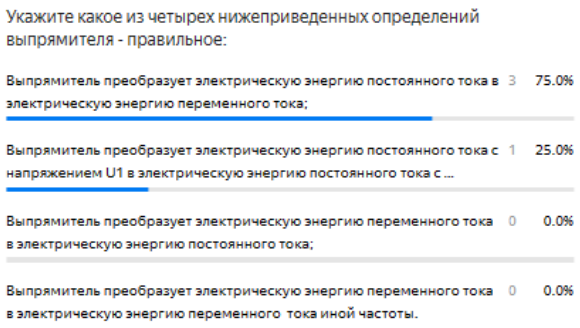


Рис. 7. Аналитический отчет по тестовому вопросу в Яндекс. Формы

(аналитика) полученных результатов. Яндекс. Формы имеют удобную опцию, с помощью которой можно оценить уровень трудности конкретного вопроса с указанием процентного соотношения выбранного студентами ответа.

Такое представление служит хорошей базой для оценки уровня сложности тестовых заданий.

Методика оценки уровня сложности тестовых заданий

Составление спецификации (или расчет сложности заданий) позволяет оценить равномерность распределения учебной нагрузки изучаемого курса, равномерно распределить задания по темам и спрогнозировать ориентировочное время прохождения теста.

Важным аспектом для преподавателя является вопрос, насколько предложенный тест в полной мере отражает знания, полученные студентами? В этом случае целесообразно выполнить расчет и анализ двух параметров [3]:

– коэффициент трудности тестовых вопросов;

– различительная способность.

При расчете коэффициента трудности используется формула (1)

$$k_i = n_i / N, \quad (1)$$

где k_i – коэффициент, характеризующий степень решаемости задания; n_i – количество студентов, правильно выполнившие i-е задание; N – общее количество студентов.

Данный коэффициент может изменяться от 0 до 1. Особое внимание следует обратить на вопросы, для которых коэффициент меньше 0,2 (тестовый вопрос достаточно сложный) и больше 0,8 (тестовый вопрос легкий). Такие задания требуют либо переработки, либо совсем исключаются из тестов.

Различительная (дифференцирующая) способность показывает, насколько хорошо тестовый вопрос разделяет тестируемых на сильных и слабых в рамках измеряемой дисциплины и определяется коэффициентом дискриминативности. Коэффициент может быть рассчитан по формуле (2)

$$K_i = k_{i1} - k_{i2}, \quad (2)$$

где k_{i1} – коэффициент решаемости i-го тестового вопроса сильной четвертью тестируемых (25 % студентов, имеющих высокие баллы); k_{i2} – коэффициент решаемости i-го тестового вопроса слабой четвертью тестируемых (25 % студентов, имеющих низкие баллы). Данный коэффициент может быть рассчитан как для отдельной группы студентов, так и для потока, объединяющего различные направления подготовки.

Интерпретация K_i:

– $K_i \geq 0{,}4$ – тестовый вопрос функционирует удовлетворительно;

– $0{,}3 \leq K_i \leq 0{,}39$ – необходима небольшая коррекция вопроса;

– $0{,}2 \leq K_i \leq 0{,}29$ – вопрос требует пересмотра;

– $K_i \leq 0{,}19$ – данный вопрос нужно исключить из теста или полностью его переделать.

Однако возможны ситуации, когда коэффициент K_i может быть отрицательным. Связано это может быть либо с ошибкой в системе оценивания, либо с некорректной формулировкой тестового вопроса. Таким образом, в процессе апробации преподаватель имеет возможность улучшать качество предлагаемого теста.

Рассмотренные цифровые платформы имеют необходимые инструменты, позволяющие преподавателю оценить, с одной стороны, насколько предложенный тест корректно настроен, с другой – выявить наиболее сложные темы с дальнейшей корректировкой лекционного материала. Обе платформы имеют существенный недостаток – невозможность загрузки в качестве вариантов ответов графических объектов, что для рассматриваемой дисциплины имеет важное значение – студенты должны не только ориентироваться в основных терминах и определениях, но и уметь моделировать и анализировать принципиальные схемы преобразователей. На платформе Open edX этот недостаток устранен благодаря наличию конструктора электросхем, что является неоспоримым преимуществом данной платформы.

Заключение

Безусловно, оценка знаний студентов не должна ограничиваться только проведением тестового контроля. Необходимо предлагать студентам

проекты, которые позволят им освоить дополнительные производственные технологии, такие как CAD, CAE, SiminTech, nanoCAD, технологии цифровых двойников Digital Twins. Разработка таких проектов позволит студентам приобрести навыки командной работы, научиться принимать и обосновывать конкретные технические решения при последующем конструировании и эксплуатации устройств промышленной электроники, будет способствовать формированию у студентов профессиональных компетенций согласно требованиям современного этапа развития электроэнергетической отрасли.

Список источников

1. Электронная информационно-образовательная среда ГУАП. URL: https://lms.guap.ru/ (дата обращения: 04.01.2023).

2. Яндекс. Формы. Электронная цифровая платформа. URL: https://forms.yandex.ru/admin/62913655fee861007670ff65/ (дата обращения: 04.01.2023).

3. Электронная платформа Опорного образовательного центра Innopolis University. URL: https://learn.innopolis.university/Trainings/ (дата обращения: 05.01.2023).

УДК 621.3.08 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-112-115**

С. Ю. Мельников*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

КОНЦЕПЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

Рассмотрен формат лабораторного практикума по большинству разделов электротехники с исследованием схем сходной конфигурации, подключаемых к источникам различного типа.
Ключевые слова: *электротехника, лабораторный практикум.*

S. Y. Melnikov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE ELECTRICAL ENGINEERING LABORATORY WORKSHOP'S CONCEPTION

The format of a laboratory workshop on most sections of electrical engineering with the study of circuits of similar configuration connected to sources of various types is considered.
Keywords: *electrical engineering, laboratory workshop.*

В настоящее время при выполнении студентами ГУАП лабораторных работ по различным разделам электротехники обычно используются схемы электрических цепей, существенно отличающиеся по своей конфигурации. В результате этого у студентов, как правило, отсутствует возможность сопоставления результатов выполненных работ, что снижает качество усвоения изучаемой дисциплины.

Поэтому представляется целесообразным унифицировать структуру исследуемых в лабораторном практикуме схем, ограничившись, в основном, схемой со смешанным соединением трех пассивных элементов, подключаемых в различных работах соответственно к источникам постоянного напряжения, напряжения синусоидальной или несинусоидальной формы, а также их комбинаций (рис. 1).

В качестве пассивных элементов схемы используются резисторы, конденсатор и катушка индуктивности неизменных номиналов, имеющиеся в составе комплекта модулей, прилагаемых для сборки схем на стендах «Основы электротехники и электроники» (рис. 2), используемых в лаборатории электротехники ГУАП [1].

Базовой схемой для лабораторного исследования предлагается использовать схему (рис. 3). Катушка индуктивности на рисунке представлена схемой замещения, учитывающей ее индуктивность L и сопротивление провода $R_к$, которым она намотана.

Исследование схем подобной конфигурации позволяет реализовать лабораторные работы практически по всем изучаемым студентами

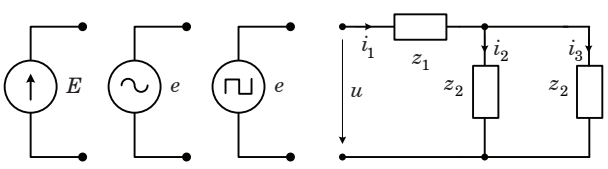


Рис. 1. Схема со смешанным соединением трех пассивных элементов

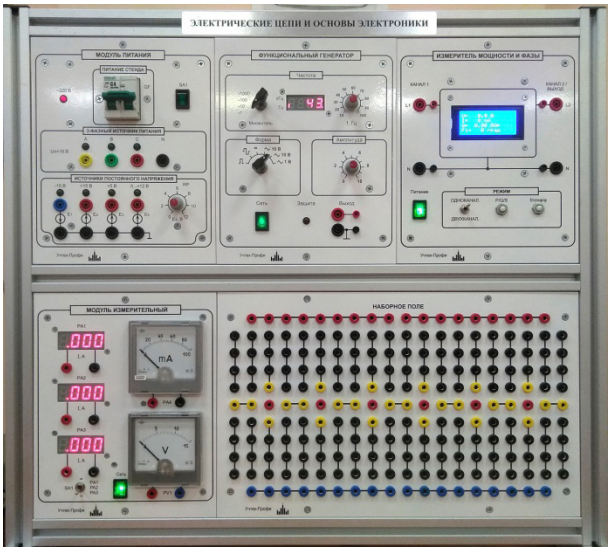


Рис. 2. Стенд «Основы электротехники и электроники»

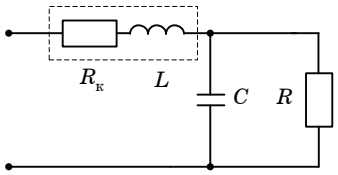


Рис. 3. Схема для лабораторного исследования

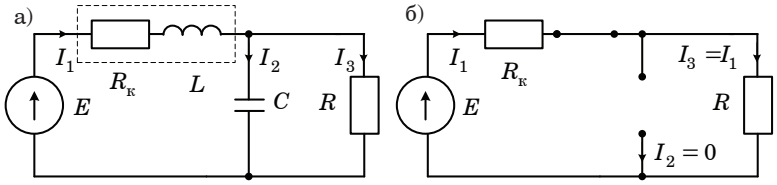


Рис. 5

разделам курса, требует минимального количества соединительных проводов на наборном поле, что упрощает процесс сборки и уменьшает количество ошибок при подключении измерительных приборов.

При изучении основ электротехники неоправданное усложнение исследуемых схем не дает, как правило, преимуществ в понимании происходящих в них процессов. В то же время исследование одной и той же простой по структуре и набору элементов схемы при питании ее от различных источников и в различных режимах работы дает возможность студентам выполнять их сравнительный анализ, улучшающий понимание предмета. Это особенно актуально при имеющем место уменьшении количества часов, отводимых для изучения электротехники у студентов технических специальностей. Неизменная структура исследуемой цепи упрощает также ее расчет и моделирование с использованием специализированных программ, таких, например, как MathCad и Multisim.

Исследование простых резистивных цепей при питании от источника постоянного напряжения предлагается выполнять по схеме (рис. 4*а*), дополняя эксперимент по схеме (рис. 5*а*) для демонстрации сопротивлений реактивных элементов постоянному току. При этом на постоянном токе схема (рис. 5*а*) фактически превращается в схему (рис. 5*б*). Величины сопротивлений R_1 и R_2 подбираются такими, чтобы они были близки к полным сопротивлениям катушки индуктивности Z_1 и конденсатора Z_2 на частоте 50 Гц.

Схема, представленная на рис. 4*а*, позволяет экспериментально проверить справедливость законов Кирхгофа, методов контурных токов и узловых напряжений при математическом описании схемы. Она может служить примером делителя напряжения и делителя тока. Ее же можно использовать для определения тока через любой из резисторов схемы методом эквивалентного источника. Например, для расчета тока I_3 этим методом параметры эквивалентного источника (рис. 4*б*) определяются соотношениями

$$E_Э = \frac{ER_2}{R_1 + R_2};\ R_Э = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2}.$$

Тогда искомый ток будет равен

$$I_3 = \frac{E_Э}{R_Э + R_3} = \frac{ER_2}{\left(R_1 + R_2\right)\left(\frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} + R_3\right)} = \frac{ER_2}{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}.$$

При включении в какую-либо из ветвей еще одного источника постоянного (или переменного) напряжения (рис. 6), схема будет пригодна для экспериментального подтверждения принципа суперпозиции [2].

После замены в схеме (рис. 4*а*) резистора R_3 на потенциометр (рис. 7), можно использовать ее для исследования в качестве линии передачи энергии от источника к приемнику, демонстрации режимов холостого хода (рис. 8*а*), короткого замыкания (рис. 8*б*) и согласованной нагрузки (рис. 8*в*).

Сопротивление нагрузки в согласованном режиме для такой схемы равно сопротивлению эквивалентного источника (рис. 4*б*)

$$R_{3согл.} = R_Э = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2}.$$

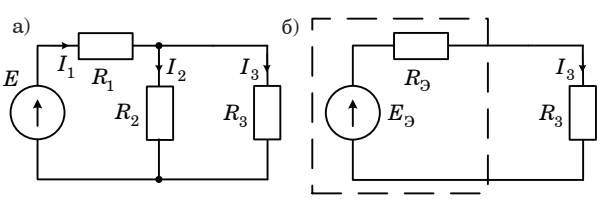


Рис. 4

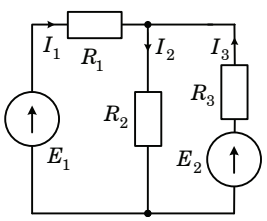


Рис. 6

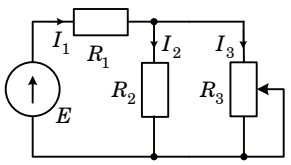


Рис. 7

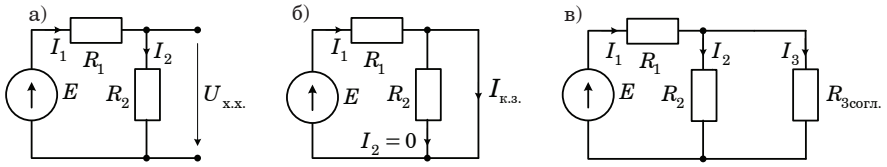


Рис. 8

Используя в качестве резистора R_3 в схеме (рис. 4*а*) нелинейный элемент, имеющийся в комплекте модулей к стенду, получим схему (рис. 9*а*) для исследования нелинейной цепи. Это дает возможность сравнить результаты эксперимента в нелинейной и аналогичной линейной цепи, а также сопоставить методы их расчета, например, метод эквивалентного источника (рис. 9*б*).

Исследование переходных процессов в цепях постоянного тока возможно при подключении содержащих реактивные элементы разветвленных схем первого (рис. 10*а*, *б*) и второго (рис. 11) порядка к источнику прямоугольного напряжения.

Данные схемы могут быть исследованы в дополнение к простейшим неразветвленным *RL*-, *RC*- и *RLC*-цепям [3]. В цепях первого порядка форма напряжения на реактивных элементах при переходном процессе определяется при подключении осциллографа к узлам *a* и *b* схемы, а форма тока – к узлам *b* и *c*. При одновременном использовании двух каналов цифрового осциллографа следует «земли» обоих каналов подключать к узлу *b* и инвертировать напряжение U_{bc}. Постоянные времени в *RL*- и *RC*-цепи (рис. 10) равны

$$\tau_{RL} = \frac{L}{R_к + \dfrac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}};\ \tau_{RC} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C.$$

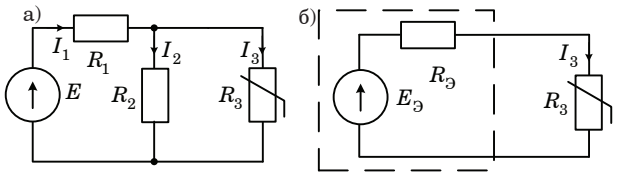


Рис. 9

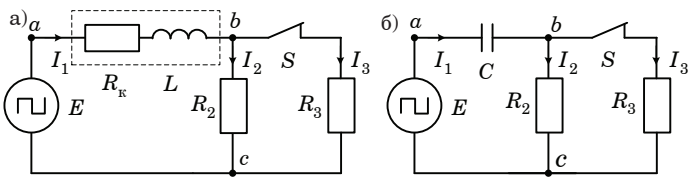


Рис. 10

С помощью ключа *S* в цепях первого порядка (рис. 10) можно изменять эквивалентное сопротивление цепи относительно выводов реактивного элемента и, соответственно, постоянную времени цепи.

В цепи второго порядка (рис. 11) в качестве переменной состояния удобно наблюдать напряжение на конденсаторе. Потенциометром R_3 в этой цепи добиваются изменения вида переходного процесса – апериодического или колебательного.

Исследовать цепи гармонического тока предлагается на основе схемы (рис. 12*а*), подключаемой к источнику синусоидального напряжения. Частота источника напряжения и параметры элементов для этой схемы, как уже упоминалось выше, подбираются таким образом, чтобы полные сопротивления Z реактивных элементов были примерно равны соответствующим активным сопротивлениям в схеме (рис.4,а) с постоянным источником. Студентам предлагается выполнить измерения токов в ветвях, напряжений на элементах, а затем сравнить результаты исследования этой цепи при подключении к синусоидальному источнику и к источнику постоянного напряжения с построением соответствующих векторных диаграмм напряжений и токов.

Изучение явлений резонанса напряжений и резонанса токов рекомендуется выполнять на базе разветвленных схем (рис. 12*а*) и (рис. 12*б*) соответственно.

Резонансная частота для схемы (рис. 12*а*)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}\left(1 - \frac{R_к}{R}\right)},$$

а для схемы (рис. 12*б*)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R_к}{L}\right)^2}.$$

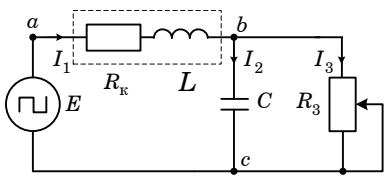


Рис. 11

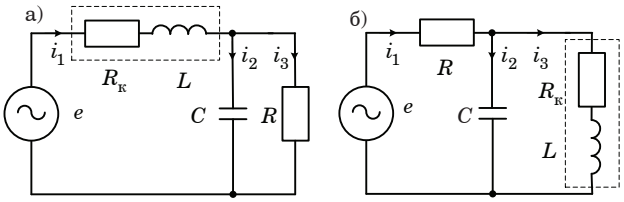


Рис. 12. Резонансная частота

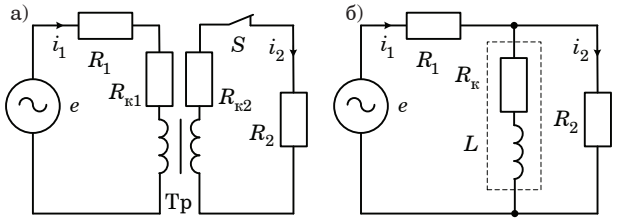


Рис. 13. Результаты измерений в схеме: а – индуктивно-связанных цепей; б – без индуктивной связи

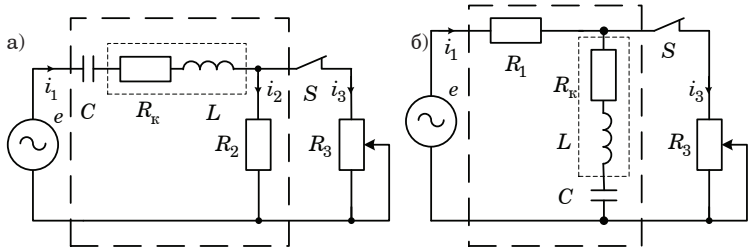


Рис. 14. Схемы для исследования простейших фильтров: а – полосового; б – режекторного

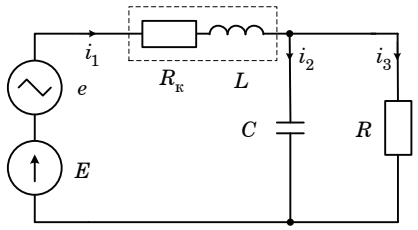


Рис. 15. Схема, подключаемая к источникам прямоугольного разнополярного, треугольного, постоянного напряжений

Исследование индуктивно-связанных цепей можно выполнить по схеме (рис. 13*а*), в которой вторичная обмотка трансформатора *Тр* через ключ *S* подсоединена к сопротивлению нагрузки R_2. Активные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора представлены на схеме резисторами $R_{к1}$ и $R_{к2}$. Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора $R_{к1}$ равно активному сопротивлению $R_к$ катушки индуктивности.

Результаты измерений в этой схеме рекомендуется сравнить с измерениями в схеме без индуктивной связи (рис. 13*б*) с построением соответствующих векторных диаграмм токов и напряжений.

Подключенную к источнику синусоидального напряжения схему с реактивными элементами (рис. 12*а*), в которой элемент третьей ветви является сопротивлением нагрузки, можно рассматривать в качестве Г-образного пассивного четырехполюсника или электрического фильтра. Например, схема на рис. 12*а* может быть использована для исследования пассивного фильтра нижних частот, а если поменять местами реактивные элементы – фильтра верхних частот. Схемы на рис. 14*а* и рис.14*б* пригодны соответственно, для исследования простейших полосового и режекторного фильтров.

Схема, подключаемая к источникам прямоугольного разнополярного, треугольного, а также постоянного напряжения (рис. 15), и их комбинации позволяет выполнять экспериментальные исследования цепей несинусоидального тока [4].

Таким образом, на основе простейших разветвленных схем предложенной конфигурации можно проводить экспериментальные исследования по темам, охватывающим большинство разделов основ теории электрических цепей. Сравнительный анализ реакции таких схем на воздействие источников различного типа обеспечивает лучшее усвоение теоретического материала и понимание процессов, происходящих в электрических цепях. Расчет токов и напряжений для цепей подобной конфигурации может быть выполнен на основе единой комплексной схемы замещения, подключаемой к соответствующим источникам.

Список источников

1. Электротехника: лабораторный практикум / С. И. Бардинский, В. А. Голубков, А. А. Ефимов и др. СПб.: ГУАП, 2017. 190 с.

2. Расчет электрических цепей. Ч. 1 / В. А. Голубков, А. А. Ефимов, В. В., Колесников и др. СПб.: ГУАП, 2018. 59 с.

3. *Ефимов А. А., Мельников С. Ю.* Расчет электрических цепей. Ч 2. СПб.: ГУАП, 2020. 72 с.

4. *Ефимов А. А., Мельников С. Ю.* Расчет электрических цепей. Ч. 3. СПб.: ГУАП, 2021. 74 с.

УДК 62-533.7 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-116-118**

Н. В. Решетникова*
старший преподаватель
С. С. Тимофеев*
старший преподаватель
Е. Ю. Ватаева*
старший преподаватель
А. В. Статкевич*
ассистент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

УСТАНОВИВШАЯСЯ ОШИБКА В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Рассматривается разработка математической модели электропривода постоянного тока независимого возбуждения, входящего в состав лабораторного комплекса «Исполнительные устройства систем управления», с управлением по угловой скорости вращения вала электродвигателя, аналитический расчет и моделирование с целью получения установившейся ошибки управляемой величины.
Ключевые слова: *электропривод постоянного тока, система управления, установившаяся ошибка, исполнительные устройства, математическое моделирование.*

N. V. Reshetnikova*
Senior Lecturer
S. S. Timofeyev*
Senior Lecturer
E. Y. Vataeva*
Senior Lecturer
A. V. Statkevich*
Assistant
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE INDEPENDENT EXCITATION DC ELECTRIC DRIVE STEADY-STATE ERROR

The article deals with development a mathematical model of direct current electric drive of independent excitation, which is part of the laboratory complex «Control system actuators», with control by angular velocity of the motor shaft, analytical calculation and modeling in order to obtain a steady-state error of the controlled value.
Keywords: *DC electric drive, control system, steady-state error, executing devices, mathematical modeling.*

Объектом исследования является электропривод постоянного тока независимого возбуждения, входящего в состав учебно-лабораторного комплекса по исследованию исполнительных устройств систем управления (рис. 1).

Электропривод включает в себя электрическую машину постоянного тока, отрицательную обратную связь по угловой скорости вращения вала электродвигателя, которая выполнена на базе энкодера с аналоговым преобразователем, напряжение которого в свою очередь поступает на сравнивающее устройство, основанного на потенциометрическом датчике, а также усилитель сигнала ошибки по напряжению.

Исполнительным устройством электропривода является электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения ПЛ-072 У3 220 В – IP 10. Основные параметры для получения математической модели приведены в табл. 1, где $R_{Я}$ и $L_{Я}$ – сопротивление и индуктивность якорной обмотки; $\omega_{Н}$ – номинальная скорость вращения вала, которую необходимо поддерживать; $U_{Н}$ – напряжение питающей сети; J – момент инерции; $k_{У}$ и $k_{ТГ}$ – коэффициенты усиления усилителя и тахогенератора, принимаемые безынерционными звеньями [1].

Таблица 1

Параметры электродвигателя ПЛ-072 У3 220 В – IP 10

$L_{Я}$, Гн	$R_{Я}$, Ом	$\omega_{Н}$, рад/с	$U_{Н}$, В	J, кг·м^2	$k_{У}$	$k_{ТГ}$
0,235	26	157,08	200	0,000986	20	0,046

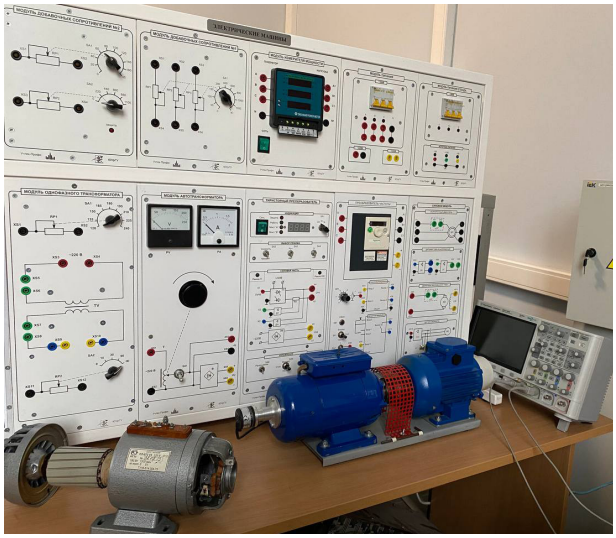


Рис. 1. Учебно-лабораторный комплекс «Исполнительные устройства систем управления»

Для получения математической модели электропривода необходимо определить передаточную функцию исполнительного механизма (ИМ) по управляемому параметру [2]. Особенностью исполнительного механизма является то, что электрическая постоянная времени

$$T_{Э} = \frac{L_{Я}}{R_{Я}}$$

более чем в четыре раза больше механической постоянной времени

$$T_{М} = \frac{R_{Я} J_{\Sigma}}{k_{ЭМ}^2},$$

что объясняется высокой индуктивностью обмотки якоря исполнительного механизма.

Передаточная функция ИМ будет иметь вид

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{k_{дв}}{T_{Э} T_{М} p^2 + T_{М} p + 1},$$

где $k_{дв}=1/k_{ЭМ}$ – коэффициент передачи двигателя; $k_{ЭМ}$ – величина, представляющая собой отношение ЭДС наводимой в обмотке якоря к угловой скорости вращения. При этом необходимо учитывать, что величина магнитного потока обмотки возбуждения будет меняться с увеличением тока нагрузки, так как будет возрастать размагничивающее действие потока, создаваемое током якоря. Для упрощения математической модели необходимо пренебречь действием реакции якоря.

При осуществлении управления по отклонению требуемое значение управляемой величины должно быть подано на вход сравнивающего устройства для выработки сигнала ошибки $e_{уст}$ [3]. В рассматриваемой схеме требуемая скорость ω выражается пропорциональным задающим напряжением $U_З$.

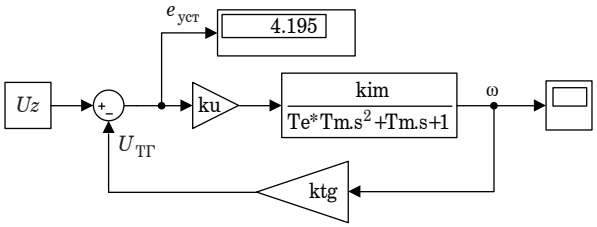


Рис. 2. Структурная схема

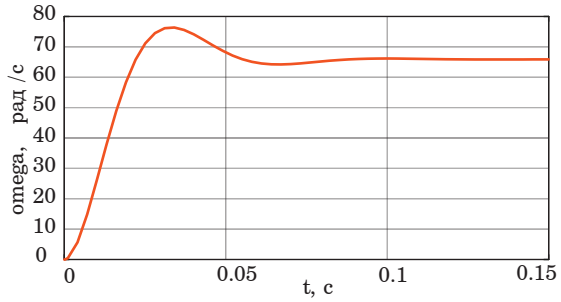


Рис. 3. График переходного процесса по скорости

Установившаяся ошибка по напряжению, пропорциональному угловой скорости вращения электродвигателя, может быть получена на выходе сравнивающего устройства путем моделирования в программных продуктах (рис. 2). График переходного процесса по скорости представлен на рис. 3.

Для аналитического расчета установившейся ошибки можно воспользоваться теоремой о предельном значении оригинала [4]

$$e_{уст} = \lim_{t\to\infty} e(t) = \lim_{s\to 0} se(s).$$

В замкнутой системе величина установившейся ошибки может быть рассчитана по следующему выражению

$$e_{уст} = \lim_{t\to\infty} e(t) = \lim_{s\to 0} se(s) = \lim_{s\to 0} s(W_e(s)g(s)),$$

где $W_e(s)$ – передаточная функция по ошибке, $g(s)$ – изображение входного сигнала.

Подставляя полученное математическое разомкнутой системы с учетом коэффициента тахогенератора и изображение ступенчатого сигнала напряжения, можно аналитически получить величину установившейся ошибки

$$e_{уст} =$$

$$= \lim_{s\to 0} s \left(\frac{7{,}2257}{s} \cdot \frac{1}{1 + \dfrac{0{,}7226}{0.0001429 s^2 + 0.01581 s + 1}} \right) =$$

$$= 4{,}195.$$

Установившаяся ошибка по рассогласованию напряжения, полученная путем моделирования и рассчитанная аналитическим методом, совпадают, что говорит о применимости и правильности обоих подходов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Список источников

1. Автоматизированный электропривод промышленных установок / Г. Б. Онищенко, М. И. Аксенов, В. П. Грехов и др. М.: РАСХН, 2001. 520 с.

2. *Шишлаков В. Ф.* Системы управления приводами: учебно-метод. пособие. СПб.: ГУАП, 2022. 223 с.

3. *Шишлаков В. Ф.* Синтез систем автоматического управления: методические указания по выполнению курсовых и дипломных работ. СПб.: ГУАП, 2022. 37 с.

4. *Бураков М. В.* Теория автоматического управления: учеб. пособие. Ч. 1. СПб.: ГУАП, 2013. 254 с.

МЕХАТРОНИКА И ВИБРАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.51 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-119-125**

Д. В. Афонин*
аспирант
А. С. Печурин*
аспирант
С. Ф. Яцун*
доктор технических наук, профессор
**Юго-Западный государственный университет*

КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТИЗИРОВАННОЙ БУКСИРОВОЧНОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрен подход к построению комбинированной системы управления роботизированной буксировочной авиационной системы, основанный на суперпозиции эталонных и корректирующих напряжений, генерируемых сигналами оптронной матрицы. Предложены структурные схемы устройства роботизированного буксировщика, системы управления, разработана расчетная схема и математическая модель, позволяющая оценить качество управления и буксировки.
Ключевые слова: *аэродромный буксировщик, система управления аэродромным буксировщиком, комбинированное управление, математическое моделирование.*

D. V. Afonin*
PhD Student
A. S. Pechurin*
PhD Student
S. F. Yatsun*
Dr. Sc. Tech., Professor
**South-West State University*

COMBINED MOTION CONTROL SYSTEM OF THE ROBOTIC TOWING SYSTEM

An approach to the construction of a combined control system for a robotic towing aircraft system based on the superposition of reference and corrective voltages generated by optocoupler array signals is considered. Structural diagrams of the device of a robotic towing vehicle, a control system are proposed, a design scheme and a mathematical model have been developed that allow evaluating the quality of control and towing.
Keywords: *airfield towing vehicle, airfield towing control system, combined control, mathematical modeling.*

Постоянный рост авиаперевозок требует развития и модернизации не только воздушных судов (ВС), но и новых средств, непосредственно обеспечивающих полеты [1], поскольку увеличения числа ВС создает проблемы для логистики современных аэропортов. Буксировка ВС является трудоемким и небезопасным процессом, требующим привлечения до шести высококвалифицированных специалистов. Эффективность буксировки определяется слаженностью действий членов бригады, которые следят за выдерживанием безопасных расстояний между элементами конструкции ВС и другими ВС, а также элементами инфраструктуры аэропорта, с целью исключения повреждений [2]. Поэтому для осуществления наземных маневров с воздушными судами применяют буксировочную аэродромную систему (БАС, *Airport's Tow System*).

Одним из путей повышения безопасности и быстродействия систем буксировки ВС, является переход к новым технологиям на основе применения роботизированных мобильных буксировщиков (РМБ, *Robotic Mobile Towing Vehicle*) [3]–[5], позволяющим значительно снизить шум и загрязнение воздуха вблизи аэропорта, а также уменьшить неэффективный расход ресурса авиационных двигателей и обеспечить значительную экономию авиационного топлива.

Роботизированная БАС (РБАС, *Robotic ATS*) позволяет значительно сократить численность

буксировочной бригады или перейти к беспилотным комплексам, решающим задачи автономной доставки ВС из текущего положения в заданное, что позволит повысить безопасность движения ВС при максимальных скоростях буксировки. Создание таких систем требует разработки математических моделей и алгоритмов управления РБАС и среды функционирования, которые адекватны реальным физическим процессам. Особое внимание должно быть уделено оценке состояния РБАС и алгоритмам управления, обеспечивающим требуемые динамические качества системы с одновременным обеспечением стабильности в условиях возможной параметрической неопределенности.

В рамках настоящей работы предлагается оригинальная структурная схема роботизированной буксировочной аэродромной системы, схема оснащения роботизированного мобильного буксировщика, архитектура управления, а также предложена математическая модель, позволяющая оценить качество управления.

Структурная схема РБАС

Оператор на основании анализа информации о состоянии окружающей среды, формирует задание для движения РМБ и ВС в соответствии с выбранной стратегией. Также оператор обрабатывает информацию, поступающую с приборов, установленных на борту РМБ и ВС, обеспечивая контроль за реальным положением объекта, и имеет возможность в экстренных ситуациях изменять параметры движения РБАС.

На основании этого была разработана структура РБАС [6] (рис. 1) для осуществления наземных маневров с воздушными судами в автономном режиме, которая включает оператора, подсистемы РМБ, ВС, модуль сопряжения (СУ), осуществляющий захват переднего колеса ВС, управляемые электроприводы (ЭП), информационную систему. Система управления включает блок планирования, который состоит из четырех блоков: построения карт аэродрома, маршрута, ближней зоны, обхода препятствий и определяет параметры траектории и закон движения по ней. Блок управления (БУ) обрабатывает информацию, поступающую с датчиков, определяющих реальное положение ВС и РМБ, а также силы взаимодействия СУ и формирует управляющие напряжения по соответствующему алгоритму. ЭП РМБ под действием управляющих напряжений осуществляют вращение ведущих колес, а электропривод тормозной системы ВС обеспечивает эффективное торможение РБАС.

Таким образом, РБАС можно рассматривать как беспилотный комплекс, решающий задачи

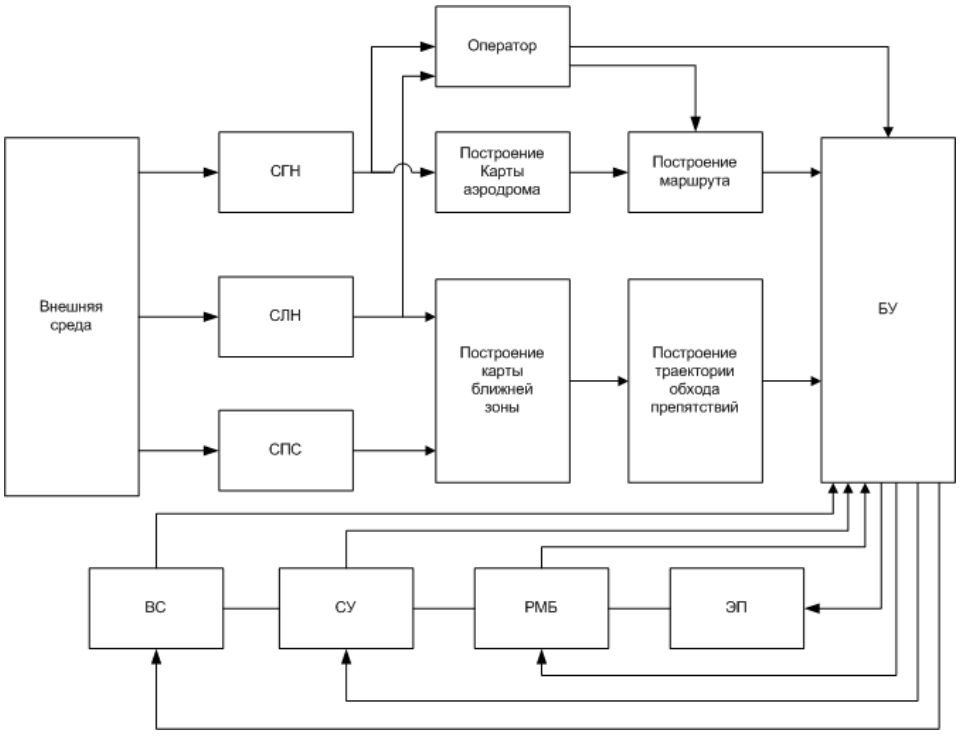


Рис. 1. Структурная схема роботизированной БАС

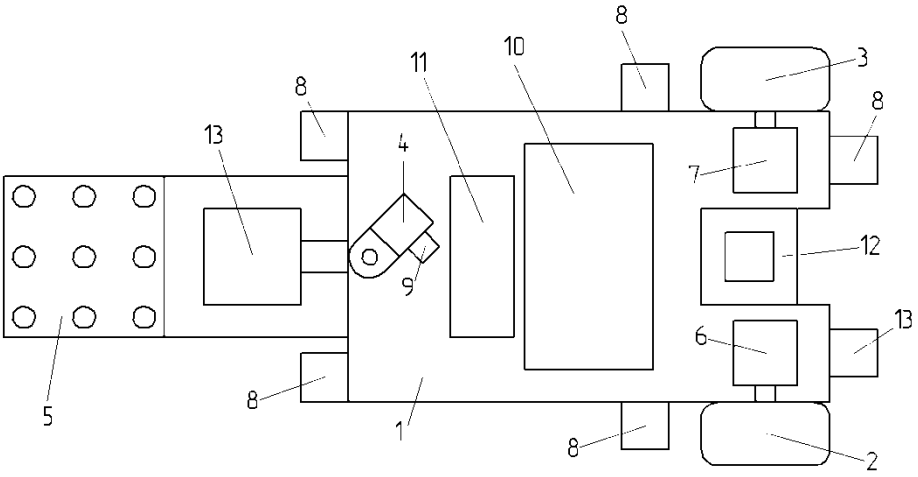


Рис. 2. Структурная схема подсистемы РМБ: корпус 1; левое приводное колесо 2; правое приводное колесо 3; рояльное колесо 4; оптронная матрица 5; электроприводы 6, 7; дальномеры 8; одометр 9; бортовой вычислитель 10; GPS-модуль 11; модуль захвата переднего колеса самолета 12; система технического зрения 13

доставки воздушного судна из начального положения в конечное, в автономном режиме при контроле со стороны оператора.

Схема и описание РМБ

Подсистема РМБ (рис. 2), представляет собой роботизированную колесную платформу с дифференциальным приводом, управление движением которой происходит с помощью двух независимых ведущих колес [7], [8]. Датчики, установленные на РМБ (оптронная матрица (ОМ), одометр, дальномеры, система технического зрения (СТЗ1, СТЗ2), GPS, лидар), позволяют определять реальное положение РМБ, а ОМ определяет отклонение реального положения от контрастной линии и формирует вспомогательное управляющие напряжения, поступающие на электроприводы РМБ. В структуре РБАС предусмотрена возможность управления электроприводами тормоза ВС со стороны блока управления и оператора. Бортовая система управления должна предоставить всю необходимую информацию о характере движения. Максимальный эффект достигается в том случае, когда оператор, РМБ, СУ и ВС образуют интегрированную человеко-машинную систему (ЧМС), эффективность работы которой определяется степенью согласованности (синхронности) работы элементов этой системы. Перемещение модуля сопряжения и захвата переднего колеса (СУ) 12 осуществляется с помощью электроприводов ведущих колес РМБ, при этом СТЗ 13 и дальномеры 8 обеспечивают контроль за положением и ориентацией РМБ относительно переднего колеса ВС.

Описание математической модели РБАС

Разработана математическая модель РБАС, схема которой приведена на рис. 3. Здесь обозначены основные геометрические и кинематические конструктивные параметры: ω_{11}, ω_{12} – угловая скорость левого и правого ведущих колес РМБ соответственно; ω_{21}, ω_{22} – угловая скорость левого и правого колес ВС соответственно; ϕ_1 – угол поворота РМБ, отсчитываемый от оси OX_0; ϕ_2 – угол поворота ВС, отсчитываемый от оси OX_0. РБАС состоит из двух секций: ВС и РМБ, которые соединены между собой упругим элементом и представляют собой трехколесные мобильные платформы. Движение происходит в горизонтальной плоскости по шероховатой поверхности. Секция РМБ обозначена A_1B_1M, а секция с ВС соответственно $A_2B_2D_2$. Точка D_2 определяет положение переднего колеса ВС на платформе РМБ и принадлежит как РМБ, так и ВС. X_0OY_0 – неподвижная система координат; $X_1C_1Y_1$ – подвижная система координат, связанная с заданной точкой РМБ. $X_2C_2Y_2$ – подвижная система координат, связанная с ВС; X_MMY_M – подвижная система координат, связанная с оптронной матрицей (ОМ).

Сила, возникающая при взаимодействии РМБ и ВС, действует со стороны ВС на РМБ и обозначена $\bar{P}_{21}$, а со стороны РМБ на ВС соответственно $\bar{P}_{12}$. Очевидно, что модули этих сил равны $P_{21} = P_{12}$.

Будем считать, что при взаимодействии подсистем РМБ и ВС возникает сила, модуль которой будем определять по формуле

$$P_{21} = C \cdot \sqrt{(D_{1X} - D_{2X})^2 + (D_{1Y} - D_{2Y})^2}, \quad (1)$$

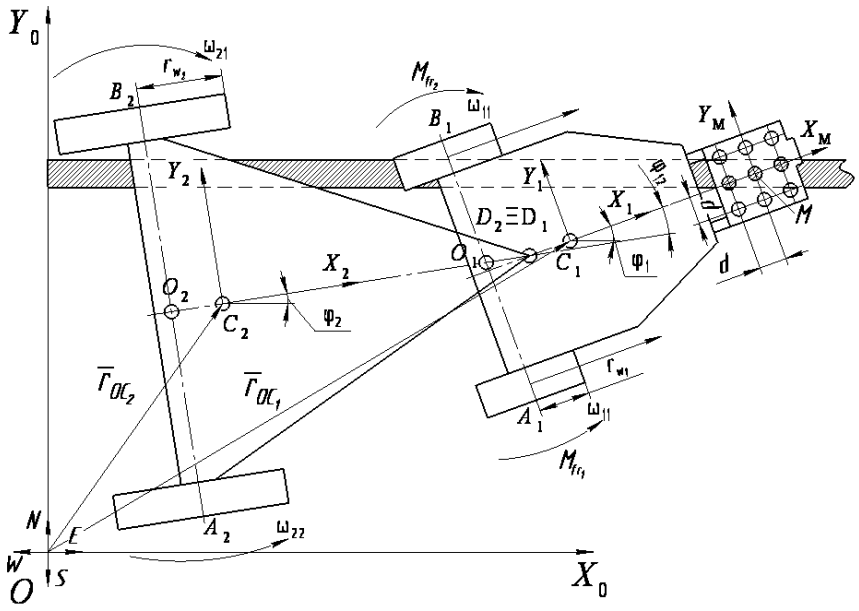


Рис. 3. Схема совместного движения подсистем РМБ и ВС

где D_{1X}, D_{1Y} – координаты точки D_1, принадлежащей РМБ; D_{2X}, D_{2Y} – координаты точки D_2, принадлежащей ВС. Параметр C определяется физико-механическими свойствами модуля сопряжения и переднего колеса ВС.

Направление вектора $\bar{P}_{21}$ определяется углом α, величину которого найдем по формуле

$$\tan\alpha = \frac{D_{1Y} - D_{2Y}}{D_{1X} - D_{2X}}. \qquad (2)$$

Будем считать, что сила взаимодействия между подсистемами ВС и РМБ $\bar{P}_{21}$ относится к внешним возмущениям по отношению к РМБ. Кроме этого, на РМБ действуют различные факторы, приводящие к появлению дополнительных возмущающих сил. Для оценки и учета этих воздействий предлагается ввести функцию $\bar{W} = \bar{P}_{21} + \bar{W}_B$.

Систему дифференциальных уравнений описывающих движение РМБ с учетом и внешних возмущений $\bar{W}$ представим в форме

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{V}}_1 \\ \dot{\Omega}_1 \\ \dfrac{\mathbf{di_1}}{\mathbf{dt}} \\ \dfrac{\mathbf{di_2}}{\mathbf{dt}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mu_1 & \mathbf{m_1 a \Omega_1} & \dfrac{\mathbf{nc}}{\mathbf{r}} & \dfrac{\mathbf{nc}}{\mathbf{r}} \\ \mathbf{m_1 a \Omega_1} & -\mu_2 & \dfrac{\mathbf{ncl}}{\mathbf{r}} & -\dfrac{\mathbf{ncl}}{\mathbf{r}} \\ -\dfrac{\mathbf{nc}}{\mathbf{r}} & \dfrac{\mathbf{ncl}}{\mathbf{r}} & -\mathbf{R} & \mathbf{0} \\ -\dfrac{\mathbf{nc}}{\mathbf{r}} & \dfrac{\mathbf{ncl}}{\mathbf{r}} & \mathbf{0} & -\mathbf{R} \end{pmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} \mathbf{V_1} \\ \mathbf{\Omega_1} \\ \mathbf{i_1} \\ \mathbf{i_2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{U_1} \\ \mathbf{U_2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dfrac{\mathbf{M_{fr_1}} + \mathbf{M_{fr_2}}}{\mathbf{rm}} \\ \dfrac{\mathbf{M_{fr_1}} - \mathbf{M_{fr_2}}}{\mathbf{rJ}} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{W} \\ \mathbf{M_{C_1}(W)} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}, \qquad (3)$$

где

$$m = m_1 + 2m_k + 2\frac{J_y}{r^2},$$

$$J = J_1 + (m_1 + 2m_k)a^2 + 2\frac{J_y}{r^2}l^2,$$

U_1, U_2 – управляющие напряжения.

В векторной форме уравнение (11) представим в виде

$$\dot{\bar{X}}_1 = \Phi_1(\bar{X}_1) + B_1\bar{U}_1 + \bar{W}_1;$$
$$\bar{X}_1 = (V_1, \Omega_1, i_1, i_2)^T. \qquad (4)$$

Аналогично запишем уравнение движения для ВС

$$\dot{\bar{X}}_2 = \Phi_2(\bar{X}_2) + B_2\bar{U}_2 + \bar{W}_2;$$
$$\bar{X}_{21} = (V_1, \Omega_1, i_1, i_2)^T. \qquad (5)$$

Система дифференциальных уравнений (4) и (5) позволяет изучать управляемое движение РБАС по заданной траектории с учетом взаимодействия подсистем РМБ и ВС и внешних возмущений $\bar{W}_1$ и $\bar{W}_2$.

Система управления РБАС

Эталонный закон движения разработан на основе метода планирования допустимых траекторий движения [9]. Зависимость координаты от времени представлена в виде:

$$x(t) = \sum_{i=0}^{5} a_i t^i;$$

значения скорости вычисляются из $\dot{x}(t) = \sum_{i=0}^{5} a_i i t^{i-1}$ и ускорения $\ddot{x}(t) = \sum_{i=0}^{5} a_i i(i-1) t^{i-2}$.

Постоянные a_i определяются из граничных условий $t = 0;\ \ x(0) = x_0;\ \ \dot{x}(0) = 0;\ \ \ddot{x}(0) = 0$, при $t = T;\ x(T) = x_к;\ \dot{x}(0) = 0;\ \ddot{x}(0) = 0.$

Аналогично задаются эталонные угловая координата ϕ_1, угловая скорость $\dot{\phi}_1$ и угловое ускорение $\ddot{\phi}_1$. Далее разработана система управления РМБ. Структурная схема предлагаемой беспоисковой адаптивной самонастраивающейся системы (БАСНС) управления движением РБАС представлена на рис. 4. Основными элементами БАСНС являются блок планирования (БП), блок интервала (БИ), эталонная модель (ЭМ), регулятор, блок настройки (БН), адаптивный регулятор (АР), объект управления (ОУ), информационная система (ИС) РБАС.

Математическая эталонная модель позволяет определить эталонное управляющее напряжение на основе дифференциальных уравнений динамики РМБ. Эталонная модель в составе БАСНС используется для задания эталона желаемого поведения, выбранного оператором на основе априорной информации о граничных условиях, выходных и входных воздействиях.

Архитектура системы управления выполнена на основе принципа суперпозиции управляющих воздействий [10]–[13]

$$\bar{U} = \bar{U}_0 + \bar{U}_e, \tag{6}$$

где $\bar{U}_0$ – управляющие воздействия, полученные по эталонной модели (15); $\bar{U}_e$ – корректирующее управление, вычисляемое по отклонению реальной траектории от заданной. Эталонная модель представлена в виде

$$\begin{cases} F_{11} + F_{12} = (m_1 + \dfrac{2 \cdot J_{W_1}}{r_{W_1}^2}) \cdot \ddot{x}(t) - \\ -m_{C_1} \cdot |O_1C_1| \cdot \dot{\phi}_1^{\,2} + \mu_{V_{O_1}} \cdot \dot{x}(t); \\ F_{11} - F_{12} = \dfrac{\left(\begin{array}{c} (J_1 + \dfrac{|A_1O_1|^2}{r_{W_1}^2} J_{W_1}) \cdot \ddot{\phi}_1(t) + \\ +m_{C_1} \cdot |O_1C_1| \cdot \dot{\phi}_1 \cdot \dot{x}(t) + \mu_{\dot{\phi}_1} \cdot \dot{\phi}_1(t) \end{array} \right)}{|A_1O_1|}. \end{cases} \tag{7}$$

Определив из (15) F_{11}, F_{12}, можно рассчитать желаемые законы изменения токов правого и левого приводов ведущих колес $i_1(t), i_2(t)$

$$i_1 = \frac{F_{11} r}{n c_M};\ \ i_2 = \frac{F_{12} r}{n c_M}, \tag{8}$$

где n, c_M – передаточное отношение привода и постоянная момента электродвигателя. Далее с учетом (16) определяются эталонные управляющие напряжения

$$\bar{U}_0 = (\mathbf{U_1}, \mathbf{U_2})^T. \tag{9}$$

Для корректировки внешних и параметрических возмущений вводятся корректирующие напряжения $\bar{U}_e = (\mathbf{u_1}, \mathbf{u_2})^T$, которые определяются по формуле

$$\bar{U}_e = k\bar{e};$$
$$k = \begin{pmatrix} \mathbf{k_{11}} & \mathbf{k_{12}} \\ \mathbf{k_{21}} & \mathbf{k_{22}} \end{pmatrix}. \tag{10}$$

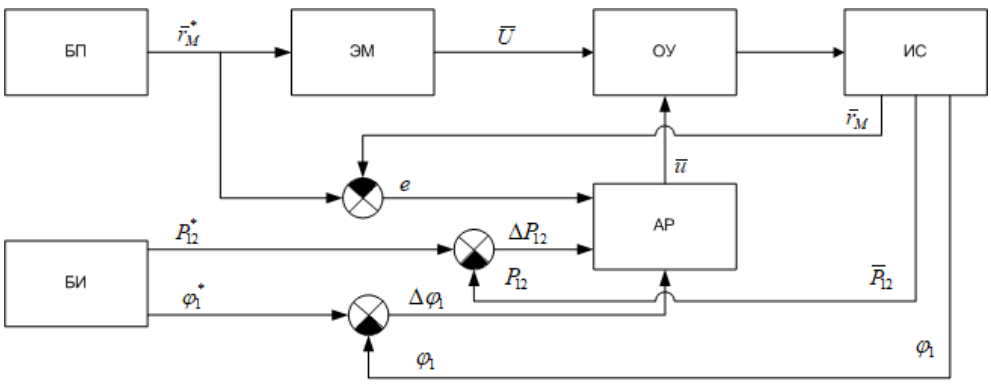


Рис. 4. Структурная схема адаптивной системы управления РБАС

Параметры матрицы регулятора k в номинальном режиме определяются методом линейно квадратичной оптимизации по критерию

$$K = \int_0^T (\bar{e}Q\bar{e}^T + \bar{U}_e R\bar{U}^T)dt. \qquad (11)$$

Здесь Q, R – положительно определенные матрицы коэффициентов размерностью 2×2. Если диапазон изменений выходных переменных значителен и происходит нарушение ограничений: $P_{121} < P_{12} < P_{122}$, $\phi_{11} < \phi_1 < \phi_{12}$, то регулятор корректирующего контура подстраивается так, чтобы поведение реальной системы минимально отличалось от модели (прямая адаптация).

Алгоритм работы системы управления роботизированного буксировщика представлен на рис. 5.

Исходя из выбранной стратегии управления РБАС выделим три основных режима управления: программного управления по эталонной модели, траекторного управления по отклонению от заданной траектории, комбинированного управления.

Сравнение этих стратегий проводится с использованием метода наименьших квадратов (МНК) оценки качества процесса управления с использованием среднеквадратичной ошибки

$$K_1 = \frac{1}{T}\int_0^T e^T Qedt, \quad K_2 = \frac{1}{T}\int_0^T \bar{U}^T N\bar{U}dt. \qquad (12, 13)$$

Оценить энергозатраты на управление движением РБАС позволяет критерий (13), где $\bar{U} = (\mathbf{U_1, U_2, U_3, U_4})^{\mathbf{T}}$ – управляющие напряжения, Q, N – положительно определенные матрицы.

Для контроля за положением РБАС относительно контрастной линии (КЛ), применяется оптронная матрица (рис. 3), которая позволяет оценивать отклонение реального положения РМБ от заданного с точностью, определяемой параметром d. Для ОМ с размером 3×3 выходные значения сигналов светодиодов датчиков формируют матрицу:

$$M = (\mathbf{C_{11}\,C_{12}\,C_{13}; C_{21}\,C_{22}\,C_{23}; C_{31}\,C_{32}\,C_{33}}).$$

Принято, что отраженным от контрастной линии сигналам, присваивается 0, в противном случае 1. Если выполнено условие $e < |d|$, то считается, что погрешность отсутствует. Ориентация ОМ определяется углом ϕ_1. На рис. 3 представлено положение ОМ для случая движения внутри интервала $e < |d|$. В этом случае матрица выходных сигналов светодиодов (МВСС) имеет вид $M = (\mathbf{101;101;101})$. Если РМБ отклонился от контрастной линии, то МВСС пред-

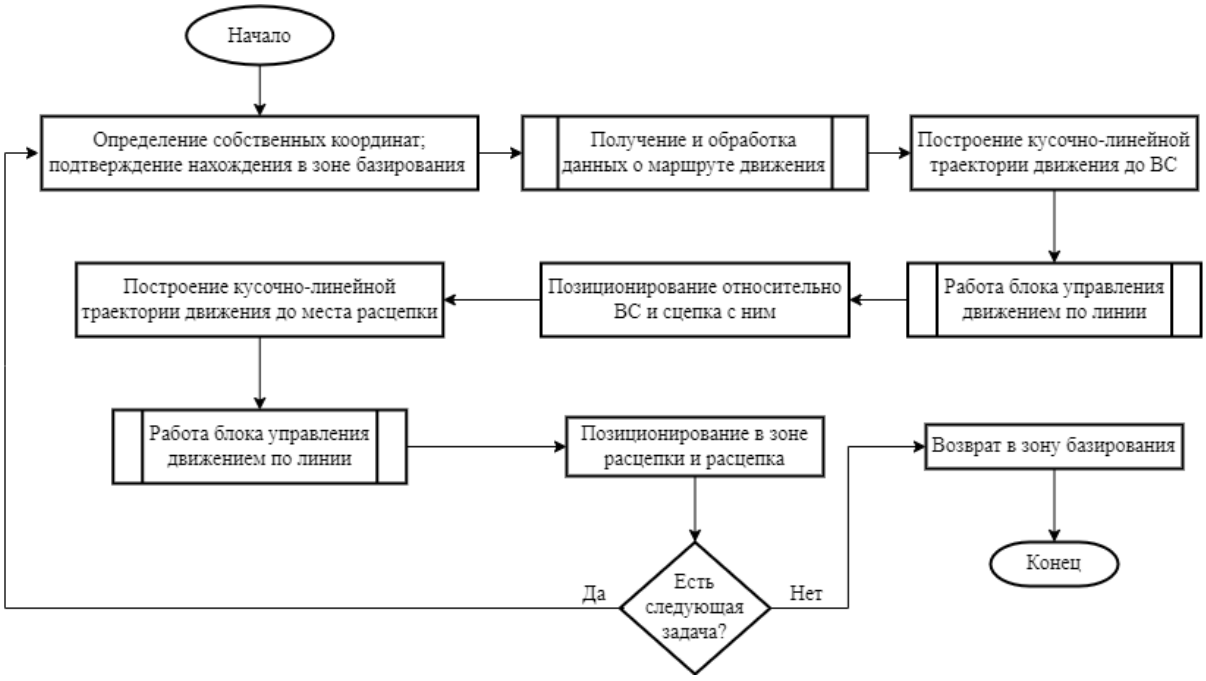


Рис. 5. Алгоритм работы системы управления роботизированного буксировщика

ставим в виде $M = (\mathbf{111;110;100})$ (рис. 3), происходит управление движением за счет корректирующих напряжений (10).

Заключение

В работе предложена структурная схема и система управления роботизированным колесным роботом для эффективной буксировки воздушных судов по аэродрому. Предлагаемый способ движения обеспечивается комбинированием генерируемых управляющих напряжений, зависящих от эталонной модели движения и сигналов оптронной матрицы. Для выявления качественных показателей эффективности буксировки была разработана математическая модель устройства, позволяющая оценить качество процесса управления, потребление энергии, а также значения крутящих моментов на колесах, влияющих на динамику движения буксировочной системы.

Исследование выполнено при поддержке Стратегического проекта «Приоритет-2030. Создание робототехнических средств для расширения функциональности человека.

Список источников

1. *Rodríguez S.* Use of robotic systems on airport management optimization: Universitat Politècnica de Catalunya, 2022.

2. *Казанцева П. И., Шевцова Н. В.* Современные проблемы гражданской авиации России // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. Т. 3. № 13. С. 458–459.

3. *Maulana R., Wibowo S.* Design and Manufacture of Remote Control Towing Tug for Cessna 172 Aircraft: Structural Analysis. Seminar Nasional Industri dan Teknologi, 2021. P. 525–532.

4. *Baaren E., Roling P.* Design of a zero emission aircraft towing system, AIAA Aviation, 2019, Forum. 2019. P. 2932.

5. *Великанов А. В., Дьяков Д. Е., Великанова Л. А.* Роботизированная система для наземного транспортирования воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА, 2021. № 37. С. 42–52.

6. *Afonin D., Pechurin A., Yatsun S.* Development of a Control System for a Robotic Towing Platform for Aircraft // Frontiers in Robotics and Electromechanics. 2022. P. 327–339.

7. *Яцун С. Ф., Бартенев В. В., Политов Е. Н.* Моделирование движения робота-тягача для транспортировки самолетов по аэродрому // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. № 22 (2). С. 34–43.

8. *Binh N., Tung N., Nam D.* An adaptive backstepping trajectory tracking control of a tractor trailer wheeled mobile robot // International Journal of Control, Automation and Systems. 2019. Vol. 17. P. 465–473.

9. *Sirigu G., Cassaro M., Battipede M.* A route selection problem applied to auto-piloted aircraft tugs. WSEAS Transactions on Electronics. 2017 (8). P. 27–40.

10. *Politov E., Afonin D., Bartenev V.* Mathematical Modeling of Motion of a Two-Section Wheeled Robot // Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" ER (ZR) 2019, 2020. Kursk, Russia, 17–20 April 2019 (P. 397–409).

11. *Simon J.* Autonomous wheeled mobile robot control // Interdisciplinary Description of Complex Systems: INDECS. 2017. 15 (3). P. 222–227.

12. *Jardine P., Kogan M., Givigi S.* Adaptive predictive control of a differential drive robot tuned with reinforcement learning. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2019. 33 (2). P. 410–423.

13. *Shih C., Lin L.* Trajectory planning and tracking control of a differential-drive mobile robot in a picture drawing application. Robotics. 2017. 6 (3), 17.

УДК 681.518 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-126-130**

П. А. Безмен*
кандидат технических наук, доцент
М. О. Алябьев*
магистрант
**Юго-Западный государственный университет*

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ ПРИ ПОМОЩИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Предложен алгоритм решения обратной задачи кинематики, использующий двухслойную нейронную сеть прямого распространения. Алгоритм позволяет задавать начальное приближение для решения обратной задачи кинематики для первой или отдаленной точки траектории, что дает возможность снизить количество итераций, необходимых для решения, а также исключить варианты, когда алгоритм решения обратной задачи кинематики не находит ответ. Использование нейронной сети позитивно сказывается на эффективности алгоритма решения обратной задачи кинематики. Применение предложенного алгоритма в робототехнике позволит интенсифицировать информационно-алгоритмическое направление обеспечения и повышения автономности роботов.
Ключевые слова: *робот-манипулятор, представление Денавита – Хартенберга, кинематика, искусственная нейронная сеть, MATLAB.*

P. A. Bezmen*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
M. O. Alyabiev*
Postgraduate Student
**South-West State University*

OPTIMIZATION OF THE ALGORITHM FOR SOLVING OF THE INVERSE KINEMATICS PROBLEM WITH THE USE OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

The proposed algorithm for inverse kinematics problem solving uses a two-layer feed-forward artificial neural network. The algorithm allows to set the initial approximation for solving the inverse kinematics problem for the first or remote point of the trajectory. It lets to reduce the number of iterations required for the solution, as well as eliminate cases when the algorithm for solving the inverse kinematics problem does not find the answer. The use of an artificial neural network has a positive effect on the efficiency of the algorithm for solving the inverse kinematics problem. The application of the proposed algorithm in robotics will intensify the information-algorithmic direction of providing and increasing the autonomy of robots.
Keywords: *robot-manipulator, Denavit-Hartenberg representation, kinematics, artificial neural network, MATLAB.*

Введение

Одной из актуальных задач науки и техники современности является создание мобильных робототехнических аппаратов промышленного, исследовательского, бытового назначения [1].

Пространственные роботы-манипуляторы используются практически во всех сферах нашей жизни, начиная от масштабных машиностроительных производств и медицинских операций и заканчивая обучающими стендами для школьников и студентов [2], [3].

В данной работе подробно исследуются вопросы управления данным устройством и способы оптимизации алгоритмов его функционирования, а именно алгоритма решения обратной задачи кинематики. Показан пример использования нейронной сети для улучшения работы одного из видов подобного алгоритма (метод Ньютона).

Решение задач кинематики робота-манипулятора

Кинематическая схема устройства робота-манипулятора представлена на рис. 1.

Движение рабочего органа манипулятора осуществляется с помощью четырех вращательных кинематических пар. Следовательно, при составлении математической модели робота-манипулятора будем учитывать, что уравне-

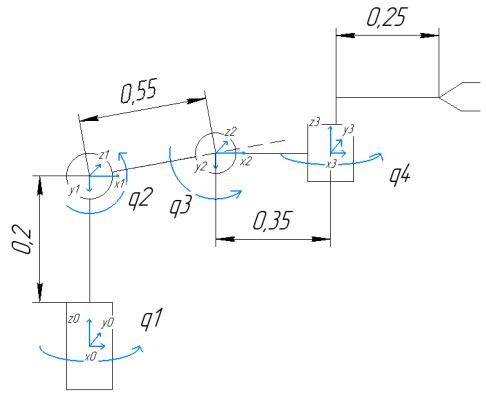


Рис. 1. Кинематическая схема робота-манипулятора

ния движения являются функцией четырех углов.

Кинематика робота-манипулятора анализируется с помощью представления Денавита – Хартенберга (ДХ-представления) [4]–[10]. Смысл ДХ-представления состоит в формировании однородной матрицы преобразования, имеющей размерность 4 × 4 и описывающей положение системы координат каждого звена относительно системы координат предыдущего звена.

Каждая система координат формируется на основе следующих трех правил:

1) ось z_{i-1} направлена вдоль оси i-го сочленения;

2) ось x_i перпендикулярна оси z_{i-1} и направлена от нее;

3) ось y_i дополняет оси x_i, z_i до правой декартовой системы координат.

ДХ – представление твердых звеньев зависит от четырех геометрических параметров, соответствующих каждому звену. Эти четыре параметра полностью описывают любое вращательное или поступательное движение.

После подбора параметров ДХ можно получить однородные матрицы преобразования, связывающие i-ю и (i–1)-ю системы координат по формуле

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & \cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

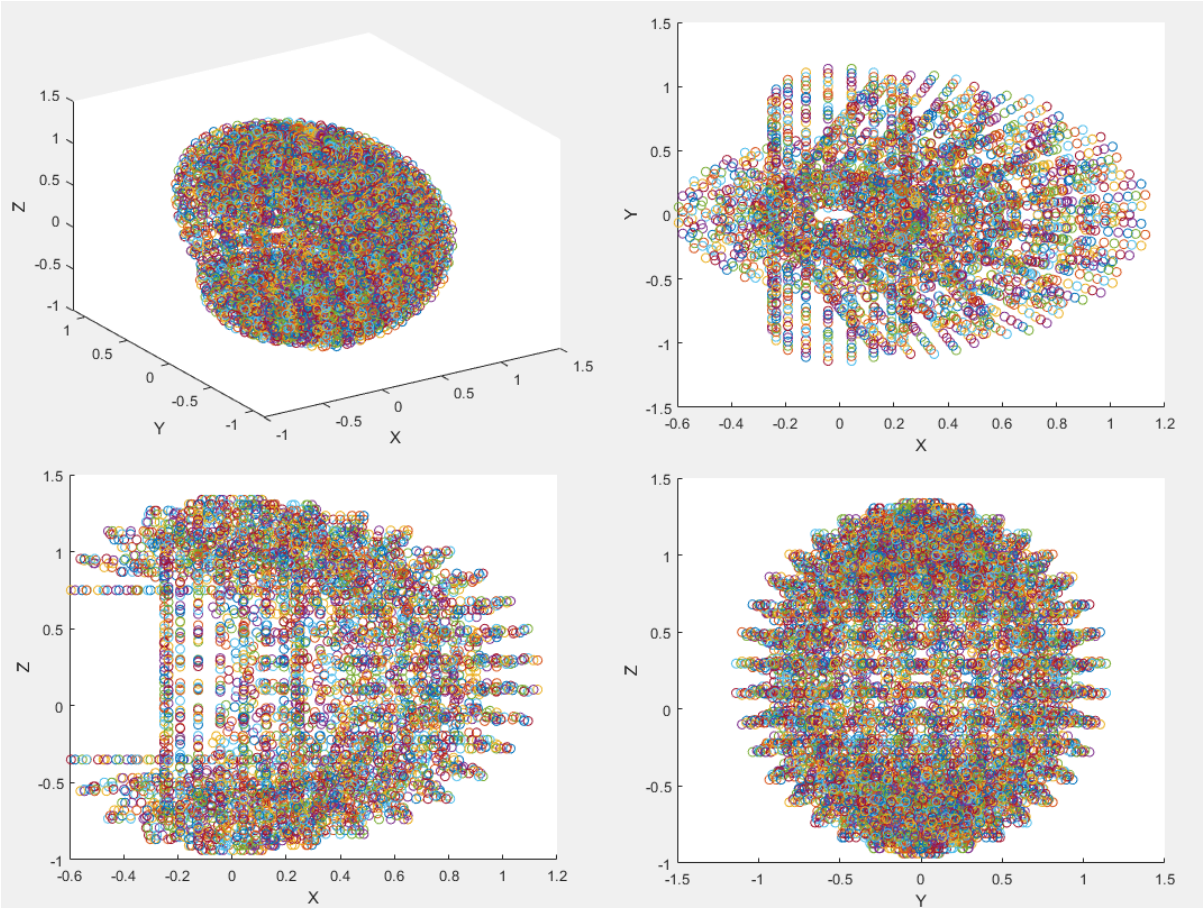


Рис. 2. Рабочая зона манипулятора

После получаем результирующую матрицу по формуле

$$T = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & p \\ 000 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где R – матрица поворота; p – матрица положения.

Далее из уравнения (2) получим рабочую зону манипулятора (рис. 2).

Оптимизация решения при помощи нейросетей

При решении обратной задачи кинематики использовался алгоритм Ньютона. Недостатком алгоритма является сильная зависимость от начального приближения. Для решения этой проблемы будет использован алгоритм на основе нейронной сети. По структуре связей нейронные сети [11]–[13] можно разделить на:

– полносвязаные нейронные сети (все входные сигналы подаются всем нейронам и каждый нейрон подает свой сигнал на все нейроны);

– неполносвязные нейронные сети (перцептроны) подразделяются на однослойные и многослойные, с прямыми, обратными и перекрестными связями.

28551	90	90	90	-60
28552	90	90	90	-45
28553	90	90	90	-30
28554	90	90	90	-15
28555	90	90	90	0
28556	90	90	90	15
28557	90	90	90	30
28558	90	90	90	45
28559	90	90	90	60
28560	90	90	90	75
28561	90	90	90	90
28562				
28563				

Рис. 3. Таблица значений углов в файле Microsoft Excel

Также многослойные нейронные сети подразделяются на следующие типы:

– монотонные (каждый слой разбит на два блока: возбуждающий и тормозящий);

– сети без обратных связей (сети прямого распространения). В таких сетях нейроны на входном слое получают сигналы, сигналы преобразуются и передаются на нейроны скрытых слоев.

1. Сети с обратными связями (информация с последующих слоев передается на предыдущие).

Для решения поставленной задачи был выбран двухслойный перцептрон с прямым распространением сигнала. Обучающая выборка формируется из решения прямой задачи кинематики. С помощью цикла задается шаг изменения угла в 15° и граничные углы –90° и 90°. Далее строится график рабочей области и на основе полученных данных – получаем два фай-

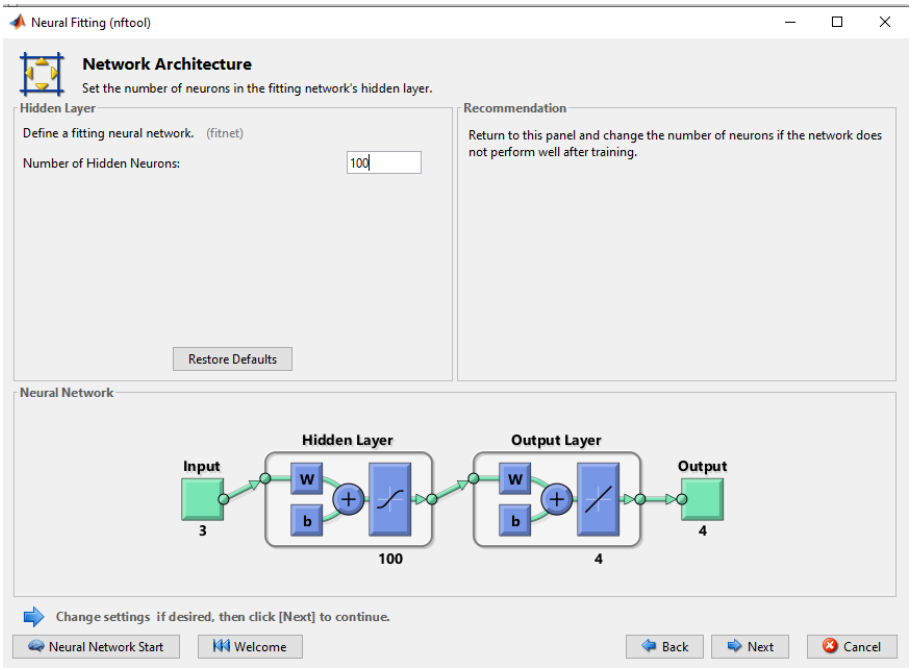


Рис. 4. Окно MATLAB для выбора количества нейронов

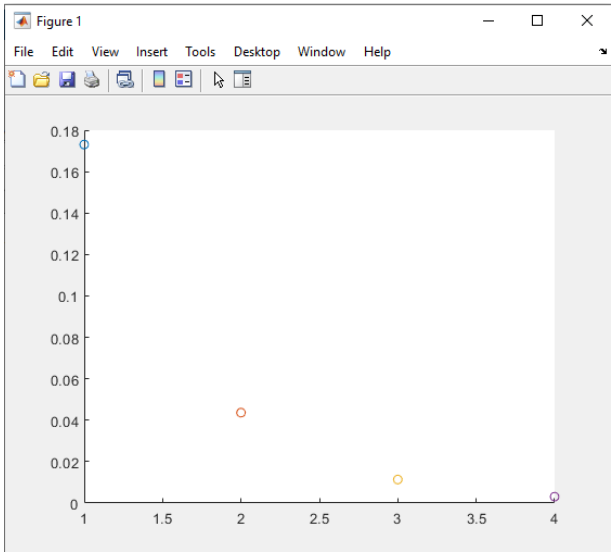


Рис. 5. Результат работы алгоритма решения обратной задачи кинематики с начальным приближением из нейронной сети

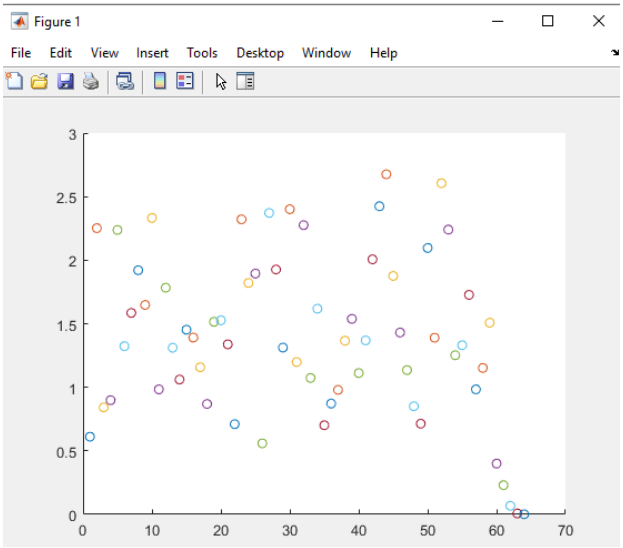


Рис. 6. Результат работы алгоритма решения обратной задачи кинематики с начальным приближением 0°

ла. В первом файле записываются значения углов θ_1, θ_2, θ_3, θ_4 а во втором файле записываются координаты x, y, z рабочего органа манипулятора. При шаге в 15° получаем таблицу данных в 28561 элемент (рис. 3).

Обучение нейросети осуществляется с помощью инструмента MATLAB Neural Network. В скрытом слое нейросети будет находиться 100 нейронов (рис. 4).

Далее обученную нейронную сеть используем как функцию в MATLAB или при необходимости можно использовать сеть в моделях Simulink.

Для проверки эффективности работы нейросети возьмем точку x=0,75 м, y=0,4 м, z=0,7 м и два начальных приближения: первое приближение с помощью нейронной сети, а второе – без нейронной сети, с углами 0°. Результаты проверки приведены на рис. 5. На оси абсцисс откладывается количество итераций, а по оси ординат ошибка позиционирования рабочего органа манипулятора.

Рис. 5 демонстрирует, что с помощью нейронной сети алгоритм находит решение за четыре итерации, что является приемлемым результатом.

Рис. 6 показывает, что без начального приближения алгоритм находит решения за 64 итерации, что в 16 раз больше итераций, чем с использованием нейронной сети. Отсюда можно сделать вывод, что использование нейронной сети позитивно сказывается на работе алгоритма решения обратной задачи кинематики, а именно позволяет:

– сильно снизить время нахождения ответа;

– избежать случаев, когда алгоритм не находит ответ.

Заключение

В рамках данной работы был предложен алгоритм оптимизации решения обратной задачи кинематики четырехзвенного манипулятора. При помощи нейронной сети задается начальное приближение, которое после используется для нахождения точного ответа при помощи метода Ньютона. Метод позволяет избежать случаев, когда алгоритм не может найти решение, а также снизить количество итераций решения обратной задачи кинематики.

Исследование выполнено при поддержке Стратегического проекта «Приоритет-2030. Создание робототехнических средств для расширения функциональности человека».

Список источников

1. *Безмен П. А.* Комплексирование данных системы управления мобильным роботом с использованием расширенного фильтра Калмана // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23. № 2. С. 53–64.

2. *Рязанцев А. Е., Гринченко М. Р., Редутов Е. В.* Разработка обучающего робота для занятий по образовательной робототехнике в специальных школах // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки / Институт космофизических исследований и распро-

странения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2020. № 2. С. 168–178.

3. *Коновалов Ю. В., Хазиев А. Н.* Новые технологии в исследовании солнечных электростанций в программе MATLAB применительно к условиям города Ангарска. Конспекты лекций по сетям и системам // Шпрингер Наука и Бизнес Медиа Германия ГмбХ. 2021. Т. 232 LNNS. С. 760–770.

4. *Колтыгин Д. С., Седельников И. А.* Метод и программа для решения прямых и обратных кинематических задач для управления роботом-манипулятором // Системы. Методы. Технологии. 2020. С. 65–74.

5. *Параев Ю. И., Колесникова С. И., Цветницкая С. А.* Новый подход к решению проблемы управления роботом-манипулятором // Вестник Томского государственного университета. Управление, высшая техника и информатика / Томский государственный университет. 2021. № 55. С. 4–10.

6. *Andreev A., Peregudova O., Petrovicheva Y.* On trajectory tracking control of prismatic and revolute joined robotic manipulators // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Prikladnaya Nelineynaya Dinamika / Saratov State University. 2021. Vol. 29. N 3. P. 398–408.

7. *Балабанов А., Безуглая А., Шушляпин Е.* Управление подводным роботом-манипулятором // Информатика и автоматизация / Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук. 2021. Т. 20. № 6. С. 1307–1332.

8. *Лозовой В. А., Никончук М. Ю., Литвинов Д. Ю.* Концепция моделирования поточных технологий методом матричных преобразований координат // Хвойные бореальной зоны, 2022. Т. 40. № 6. С. 552–557.

9. *Смирнов А., Яковлев Н.* Решение прямой и обратной задач кинематики в системе позиционирования звеньев манипулятора // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2019. Т. 20. № 12. С. 732–739.

10. *Крылов Д. М., Барабанов В. Г., Крылов Е. Г.* Разработка системы дистанционного робота-манипулятора с пятью степенями свободы // Известия волгоградского государственного технического университета / Волгоградский государственный технический университет. 2021. № 1 (248). С. 63–67.

11. *Чжэнцзе Ю., Клочков Ю. С., Лин Х.* Повышение точности робота с помощью нейронных сетей (нейронные компенсаторы и нелинейная динамика) // Известия Самарского научного центра РАН. 2022. Т. 24. № 4. С. 106–115.

12. *Ibrahim I., Akkad M.* Solving the kinematics of an aerial human-like manipulator using the differential evolution algorithm // Bulletin of Kalashnikov ISTU / Kalashnikov Izhevsk State Technical University. 2019. Vol. 22. N 3. P. 33.

13. *Solovyeva E., Abdullah A.* Controlling system based on neural networks with reinforcement learning for robotic manipulator // Informatsionno-Upravliaiushchie Sistemy / Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. 2020. N 5. P. 24–32.

14. *Беляев А. К.* Модель и метод обучения искусственной нейронной сети для сферы робототехники информационной безопасности // Безопасность. Управление. Искусственный интеллект. 2022. Т. 3. № 3. С. 18–27.

15. *Василенко И. В., Ведякова А. О.* Исследование алгоритмов траекторного управления роботом манипулятором // Современные информационные технологии и ИТ-образование, 2022. Т. 18. № 1. С. 62–71.

16. *Вейна В. С., Морковин А. В.* Применение нейронных сетей типа многослойный персептрон для решения задачи прогнозирования поведения функции прогиба балки под действием изменяющейся нагрузки // Ученые записки комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 3. С. 24–28.

17. *Галямов А. Э., Отекина Н. Е.* Нейросети // Мир инноваций. 2022. № 1. С. 43–46.

18. *Дунаева Е. С.* Специфика применения роботов-манипуляторов в производстве // Актуальные вопросы современной экономики. 2021. № 10. С. 50–55.

19. *Ковалев А. В., Исаева А. С.* Методика подготовки набора данных для обучения и тестирования нейронных сетей в среде MATLAB // Инженерный вестник Дона. 2021. № 12. С. 276–285.

20. *Пестрикова Т. В., Бирюкова Е. Д.* Построение динамической модели бионических пальцев руки для протезирования // Перспективы науки. 2021. № 8. С. 49–53.

УДК 615.47 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-131-133**

А. А. Князев*
магистрант, инженер
А. В. Федоров*
аспирант
С. Ф. Яцун*
доктор технических наук, профессор
**Юго-Западный государственный университет*

МЕТОД КОНТРОЛЯ СИЛ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТОПЫ И ПЛАТФОРМЫ ПРИБОРА ДЛЯ АКТИВНО-ПАССИВНОЙ МЕХАНОТЕРАПИИ ГОЛЕНОСТОПНОГО СУСТАВА

Разработан метод контроля сил взаимодействия между стопой и платформой для активно-пассивной механотерапии голеностопного сустава. Целью работы является повышение эффективности реабилитации голеностопного сустава за счет индивидуальной настройки устройства. Настройки прибора основана на контроле сил взаимодействия стопы и платформы для обеспечения равномерного контакта в момент фиксации ноги пациента. Результаты исследований могут быть использованы для создания механотерапевтического устройства, обеспечивающего заданное движение стопы при непрогнозируемом изменении физиологических параметров с возможностью персонифицированной настройки для повышения эффективности реабилитационных мероприятий.
Ключевые слова: *механотерапия голеностопного сустава, датчики контроля силы, система автоматического управления, блок принятия решений, математическая модель.*

A. A. Knyazev*
Postgraduate Student, Engineer
A. V. Fedorov*
PhD Student
S. F. Yatsun*
Dr. Sc. Tech., Professor
**South-West State University*

METHOD FOR MONITORING THE INTERACTION FORCES OF THE FOOT AND ANKLE PLATFORM OF THE ACTIVE-PASSIVE MECHANOTHERAPY DEVICE

A method has been developed to control the interaction forces between the foot and the platform for active-passive mechanotherapy of the ankle joint. The aim of the work is to increase the effectiveness of ankle rehabilitation by customising the device. The adjustment of the device is based on controlling the interaction forces between the foot and the platform to ensure uniform contact at the time of fixation of the patient's foot. The results of the research can be used to create a mechanotherapeutic device that provides a predetermined movement of the foot under unpredictable changes in physiological parameters with the possibility of personalized adjustment to increase the effectiveness of rehabilitation measures.
Keywords: *ankle mechanotherapy, force control sensors, automatic control system, decision-making unit, mathematical model.*

Введение

Среди травм нижних конечностей наиболее распространенными являются травмы дистального отдела голени и лодыжек, которые по данным литературы составляют от 12,0 до 20,0 % от всех переломов опорно – двигательного аппарата (ОДА) (Волков В. М., 1998; Дыхне Л. У., 1991 г.), из них в 12–39,8 % случаев наблюдаются неудовлетворительные исходы лечения, а длительная нетрудоспособность составляет от 4 до 8 месяцев. Одной из наиболее распространенных травм, получаемых человеком, является повреждение голеностопного сустава при выполнении спортивных, бытовых, производственных упражнений, а также в результате автомобильных аварий [1]. Падение с высоты с приземлением на ноги, в том числе при выполнении прыжков с парашютом, также часто приводит к травмированию голеностопного суста-

ва (ГС). По статистике более половины травм нижних конечностей и около 40 % суставных травм составляют травмы голеностопного сустава. Также известно, что 54 % переломов и переломо-вывихов голеностопного сустава случаются в молодом возрасте, когда человеку важно сохранять трудоспособность. После травмы происходит длительный процесс лечения и реабилитации, после хирургического вмешательства реабилитация может быть осложнена длительной неподвижностью сустава. Даже при качественном лечении травмы голеностопа приводят к инвалидности в 10–12 % случаев [2]. Поэтому восстановление функций голеностопного сустава требует индивидуального подхода для каждого пациента. Для снижения процента осложнений в последние годы получил распространение метод непрерывного пассивного движения (НПД) [3]. Для его реализации появляются медицинские приборы механотерапии, позволяющие ускорить процесс восстановления больного. В тоже время в силу влияния изменяющихся неопределенным образом параметров мышечной системы ГС обеспечить необходимую точность движения стопы пациента по заданной врачом траектории достаточно сложно, что приводит к снижению эффективности реабилитационного процесса [4]. Поэтому создание таких приборов требует глубокой проработки теории взаимодействия человека и прибора, создания человеко-машинных интерфейсов, математических моделей и алгоритмов управления, обеспечивающих заданные показатели качества. Таким образом, вопросы разработки и создания роботизированных аппаратов для посттравматической реабилитации голеностопного сустава, обеспечивающие заданное движение стопы при непрогнозируемом изменении физиологических параметров, являются актуальными.

Метод контроля взаимодействия

Принцип работы контроля сил, возникающих при взаимодействии УМП и стопы пациента, основан на контроле относительного перемещения элементов верхнего и нижнего модулей мобильной платформы в четырех точках. Соответственно, устройство оснащено датчиками, измеряющими величину усилия между стопой пациента и мобильной платформой в этих точках. В активном режиме пациент обеспечивает движение стопы, а платформа АПМГС копирует это движение, для чего используется импедансное управление. Мобильная платформа через систему эластичных связей присоединяется к стопе пациента, приводная платформа оснащена датчиками угла поворота и управляемыми электроприводами и обеспечивает заданное движение стопы. При возникновении относительного перемещения одной платформы относительно другой возникает деформация упругих элементов измерителя, которая регистрируется датчиком перемещения [5].

Максимальной эффективности прибора можно достигнуть только при выполнении правильной настройки аппарата для каждого пациента. Анализирующим критерием правильной настройки является условие, что значения четырех датчиков сило-моментного взаимодействия находятся на одном уровне

$$k_{\phi} = \int_0^T [(R_1 + R_2) - (R_3 + R_4)]dt;$$

$$k_{\psi} = \int_0^T [(R_1 + R_3) - (R_2 + R_4)]dt.$$

где T – интервал времени, на котором оцениваются критерии k_{ϕ} и k_{ψ}.

Для того чтобы автоматизировано производить настройку прибора, предлагается алгоритм блока принятия решений САУ (рис. 1).

В данном алгоритме отражена взаимосвязь между значениями ошибки реакции опоры четырех датчиков сило-моментного взаимодей-

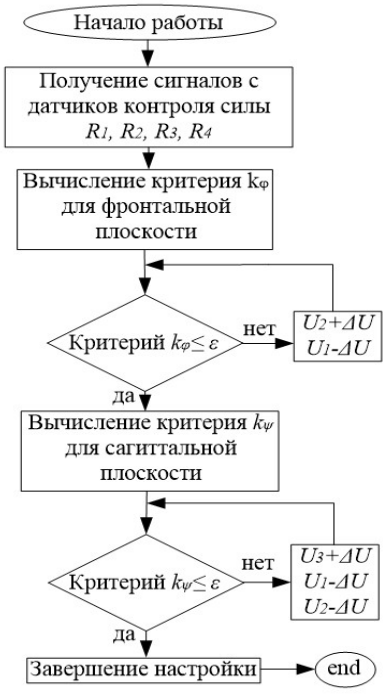


Рис. 1. Алгоритм блока принятия решений

ствия и управляемыми напряжениями для обеспечения равномерного контакта между УМП и стопой пациента.

Заключение

Разработан метод контроля сил между стопой и платформой для персонифицированной настройки устройства и последующего выполнения реабилитационных мероприятий на основе принципов НПД.

Результаты исследований могут быть использованы для создания механотерапевтического устройства, обеспечивающего заданное движение стопы при непрогнозируемом изменении физиологических параметров с возможностью персонифицированной настройки для повышения эффективности реабилитационных мероприятий.

Список источников

1. Травмы голеностопного сустава. URL: https://www.ottobock.com/ru-ex/ru/disease_patterns_and_symptoms/ankle_injuries (дата обращения: 13.02.2023).

2. Физиология мышечной ткани. URL: https://studme.org/406246/meditsina/fiziologiya_myshechnoy_tkani (дата обращения: 25.01.2023).

3. *Князев А. А., Яцун С. Ф., Федоров А. В.* Управление прибором для механотерапии голеностопного сустава // Медицинская техника. 2022. № 6 (336). С. 14–17.

4. *Vallés M., Cazalilla J.* A 3-PRS parallel manipulator for ankle rehabilitation: towards a low-cost robotic rehabilitation. Robotica, 2017. P. 1939–1957.

5. Design and Workspace Analysis of a Parallel Ankle Rehabilitation Robot (PARR) / L. Zhang, J. Li, M. Dong et al. // Journal of Healthcare Engineering. 2019. 10 p.

УДК 542.63: 007.52 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-134-139**

М. В. Коробчук*
кандидат технических наук, докторант
А. Н. Веригин*
доктор технических наук, профессор
**Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)*

МЕХАТРОННЫЕ ВИБРАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ В ПРОЦЕССАХ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Рассмотренные в статье вопросы перемешивания жидких и смешивания сыпучих химических веществ имеют достаточно длительную историю и напрямую связаны с развитием как техники, так и технологии. В споре между достигнутым уровнем развития техники и требованиями повышенных интенсивности и энергоэффективности со стороны технологии пока побеждает последняя. Наметившаяся в последние десятилетия тенденция создания химического оборудования, характеризуемая не просто стремлением добиться высокой степени автоматизации, но и создать условия для его перехода на качественно новый уровень развития, требует более гибкого подхода и пристального внимания к вопросам разработки и проектирования современных объектов химической техники. На основании описанных в данной работе отдельных процессов, весьма характерных для химической технологии, показана состоятельность реализуемого авторами междисциплинарного подхода при создании оборудования нового поколения, что позволяет говорить о перспективности выбранного направления развития, в том числе и в контексте общего развития отечественной химической промышленности.
Ключевые слова: *химическая, промышленность, технология, вибрация, мехатроника.*

M. V. Korobchuk*
PhD Sc. Tech., Doctoral Student
A. N. Verigin*
Dr. Sc. Tech., Professor
**St. Petersburg State Institute of Technology*

MECHATRONIC VIBRATION INSTALLATION IN THE PROCESSES OF THE CHEMICAL INDUSTRY

The issues of mixing liquid and mixing bulk chemicals have a long history and are directly related to the development of engineering and technology. In the dispute between the achieved level of development of technology and the requirements of increased intensity and energy efficiency of technology, technology wins. The latest trends in the creation of chemical equipment are characterized by the desire to achieve a high degree of automation and create conditions for its transition to a new level of development. Based on the individual processes of chemical technology described in this paper, the viability of the interdisciplinary approach implemented by the authors in the creation of new generation equipment is shown.
Keywords: *chemical industry, chemical technology, vibrating technique, mechatronics.*

Основное содержание химической технологии составляют многочисленные и всевозможные процессы подготовки и химического превращения веществ, которые по своему разнообразию не имеют аналогов ни в одной другой области человеческих знаний.

Главное требование к конструкции реакционного и смесительного оборудования – достижение максимального выхода целевого продукта при возможно более высокой степени превращения исходных веществ. Одновременно с этим конструкция оборудования должна быть достаточно простой, доступной для осмотров и технологичной для обслуживания на всех этапах жизненного цикла.

На практике существует большое число различных физических и химических превращений, которые характеризуются специфичностью и индивидуальностью обрабатываемых (перерабатываемых) сред, участвующих в процессе, а также большим разнообразием типов и конструкций оборудования [1], [2]. Несмотря на это, обобщенное рассмотрение химического оборудования на основе общих принципов оказывается возможным и во многом благодаря достижениям из области современных электрон-

ных систем, значение которых в химической технике для организации оптимальных химических процессов все больше возрастает [3], [4].

Одними из основных процессов переработки химических веществ являются стадии перемешивания (жидких) сред и смешивания (сыпучих) материалов. Качество их организации и протекания определяют не только свойство готового продукта, но и эффективность, и безопасность технологии в целом [5].

Вибрационные аппараты для обработки жидких сред

Безопасность переработки жидких сред в аппаратах перемешивания обеспечивается за счет того, что в реакционном объеме находятся в основном прореагировавшие вещества, а исходные компоненты подаются непосредственно в зону смешивания со скоростью, близкой к скорости их взаимодействия. Для наибольшей стабильности и безопасности производства необходимо следить за тем, чтобы в реакционном объеме отсутствовал градиент температуры и/или концентрации. Конструкция аппарата и реализуемый гидродинамический режим работы должны исключать наличие или появление застойных зон. В них вследствие недостаточного отвода тепла может происходить местный перегрев реакционной массы, способный привести к резкому увеличению скорости основной и побочной реакций, что весьма опасно [6].

Для лучшего контакта подаваемых в аппарат компонентов и повышения скорости реакции, а также для интенсивного и равномерного отвода теплоты необходимо обеспечить интенсивное перемешивание, для чего реакторы традиционно снабжаются пропеллерными или турбинными мешалками.

Одной из современных альтернатив перемешивающим устройствам с вращающимися мешалками являются аппараты вибрационного действия, которые из-за отсутствия вращающихся частей обладают уникальными достоинствами:

– в объеме перемешиваемой жидкости и на ее поверхности не образуются завихрения (не образуется пена);

– в приводе и узле уплотнения отсутствуют пары трение и, следовательно, нет необходимости в применении смазочных материалов;

– отсутствие в узлах уплотнений подвижных частей позволяют обеспечить полную герметичность и стерильность условий обработки сред;

– потребление энергии на 40 % меньше, чем у вращающихся мешалок;

– интенсивное перемешивание предотвращает локальные перегревы жидкости;

– возможность обработки склонных к расслаиванию эмульсий и равномерное распределение подводимой энергии по перемешиваемому объему;

– ускоренное протекание химических реакций;

– простой монтаж, высокая надежность, длительный срок службы и низкие затраты на обслуживание;

– реализуемый гидродинамический режим исключает необходимость применения дополнительных внутренних устройств (перегородок).

Попытки полезного применения вибрационного воздействия имеют более чем 150-летнюю историю, однако лишь в настоящее время появляются возможности для наиболее полной их реализации и более того, для перехода на новый технический уровень [7], [8].

В отечественной химической технологии аппараты вибрационного перемешивания (АВП) пока не находят широкого применения, однако результаты лабораторных и полупромышленных испытаний свидетельствуют, что их внедрение является прогрессивным направлением и может использоваться для интенсификации целого ряда химических производств. Так, аппараты вибрационного перемешивания могут использоваться для перемешивания жидкостей, эмульсий и суспензий, тепло- и массопереноса (например, химические реакции, кристаллизация, экстракция, сорбция, растворение, контакт газов или твердых частиц с жидкой средой).

Следует отметить, что именно благодаря применению современных вибрационных технологий при переработке целого ряда химических веществ возможны принципиальные перемены и значительная интенсификация перемешивания, прежде всего, за счет перспективного и эффективного способа подвода энергии непосредственно к обрабатываемой среде.

На рис. 1 представлена конструкций АВП, характеризующаяся высокой интенсивностью перемешивания и эффективностью работы. Аппараты подобной конструкции могут снабжаться рубашкой и/или змеевиком (на рисунке не показано). Традиционно змеевик может быть использован для охлаждения, а рубашка для подвода пара при необходимости подогрева. Конструкция уплотнительного устройства вибрационного перемешивающего устройства не подразумевает применения технических жидкостей или масла, что принципиально исклю-

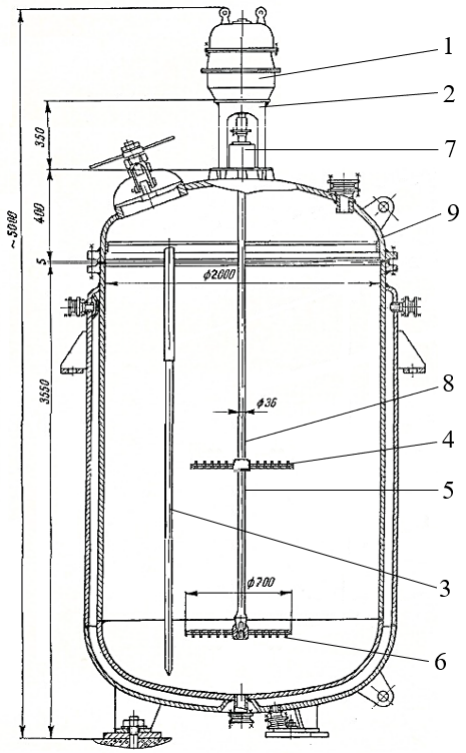


Рис. 1. Общий вид аппарата с ВПУ:
1 – вибрационный привод; 2 – опорная стойка;
3 – термопара; 4 – мешалка верхняя; 5 – шток;
6 – мешалка нижняя; 7 – уплотнение; 8 – корпус;
9 – крышка

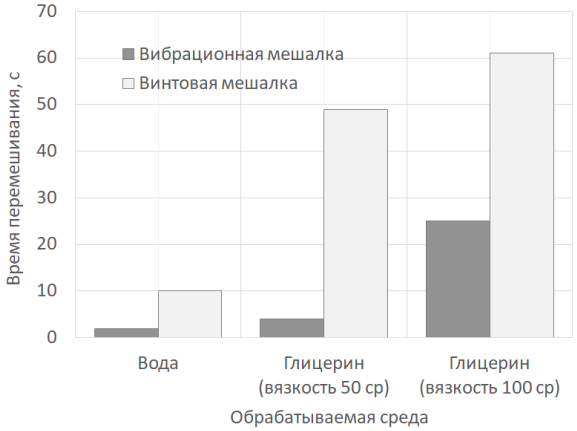


Рис. 2. Интенсивность перемешивания

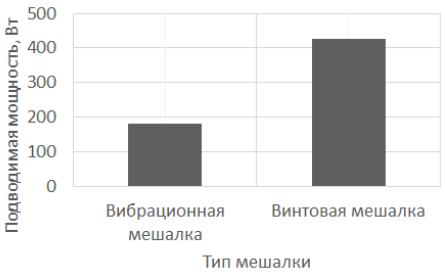


Рис. 3. Эффективность перемешивания

чает их попадание в реакционный объем и последующее самовозгорания, например, если обрабатываемая среда содержит концентрированные кислоты. Вал с мешалкой закрепляется в стойке, объединенной с узлом уплотнения, который в зависимости от конструкции и примененных материалов может работать при давлениях до 10 МПа и температуре до 200 °С.

Конструкция аппарата и привода позволяют выполнить не только комплексную автоматизацию перемешивания, но и существенно повысить эффективность, общую безопасность и его качество.

На диаграммах рис. 2 и 3 представлены результаты сопоставительных испытаний, на которых видно, что при достижении одинаковой интенсивности и эффективности перемешивания АВП оказываются более перспективными, нежели традиционные механические перемешивающие устройства (винтовые мешалки).

К одному из факторов, существенно сдерживающих широкое внедрение аппаратов вибрационного перемешивания в повседневную практику химических производств, относится их высокая эффективность лишь при работе с жидкими средами, имеющими относительно невысокую вязкость. Однако это справедливо лишь при условии, что в качестве перемешивающего устройства используются традиционные конструкции вибрационных мешалок [9]. Работы по комплексному совершенствованию и развитию аппаратов вибрационного перемешивания, выполняемые в СПбГТИ (ТУ) уже на данном этапе позволяют говорить об их перспективности и создании реакционного оборудования следующего поколения.

Вибрационные аппараты для обработки сыпучих материалов

Применение сыпучих материалов и производство на их основе композиций, характеризуемых высокой степенью однородности, требует внедрения в химическую технологию оборудования принципиально нового типа, к результатам работы которого предъявляются особенно строгие требования. Отчасти это связано с тем, что современная технология производства характеризуется стремлением внедрения современных рецептур, содержащих большое количество существенно отличающихся по физико-механическим свойствам добавок, некоторые из которых вводятся в очень незначительных объемах (менее 1 %). Задача однородности распределения входящих в состав рецептуры ингреди-

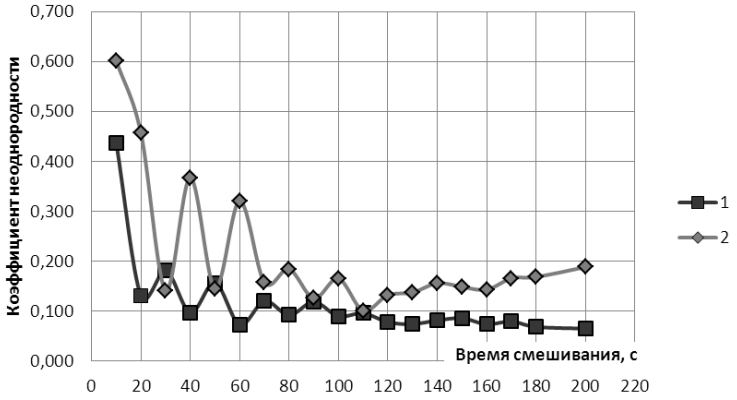


Рис. 4. Изменение коэффициента неоднородности смеси во время смешивания: 1 – нелинейные колебания; 2 – гармонические колебания

ентов стоит очень остро. Применение традиционного смесительного оборудования, содержащего подвижные внутренние перемешивающие устройства, не всегда может гарантировать достижение требуемого результата. Прекрасной альтернативой в таком случае является применение вибрационных смесителей. К их достоинствам следует отнести:

– отсутствие подвижного устройства перемешивание существенно упрощает как обслуживание, так и эксплуатацию;

– рабочая емкость легко герметизируется;

– короткий временной цикл смешивания;

– интенсивное воздействие исключает образование застойных зон;

– возможность обработки смесей, содержащих в незначительных количествах тонкодисперсные ингредиенты;

– простой монтаж, высокая надежность, длительный срок службы и низкие затраты на обслуживание;

– возможность организации непрерывного процесса.

Получившие распространение вибрационные смесители гармонического типа прекрасно себя зарекомендовали, целесообразность их применения для обработки сыпучих смесей не вызывает сомнений. Однако следует признать, что к настоящему времени они уже исчерпали свои возможности, поэтому работы по их совершенствованию сводятся к оптимизации конструкции и общему повышению энергетической эффективности, прежде всего, за счет применения современных приводов и систем управления.

Действительные же перспективы повышения их эффективности лежат в области полезного использования эффектов нелинейного вибрационного воздействия на обрабатываемые среды [10]. Использование эффектов нелинейных (хаотических, полигармонических) колебаний позволит расширить горизонты возможностей вибрационной техники, по сути, являющей собой следующее поколение машин.

Несомненно, на пути внедрения и управления эффектами нелинейных колебаний существует множество проблем, требующих решения, однако результаты выполненных лабораторных и полупромышленных испытаний показывают перспективность и возможность их реализации [11]. На рис. 4 представлены результаты эксперимента по смешиванию многокомпонентной смеси при наложении гармонических и субгармонических колебаний. Из представленных данных видно, что в случае нелинейного воздействия смесь быстрее достигает равновесного состояния, кроме того, характеризуется и более высокой стойкостью к расслаиванию.

Одним из основных достоинств вибрационной техники в целом является возможность полной автоматизации [12]. Автоматические контроль и регулирование позволяют полностью удалить обслуживающий персонал из опасных зон производства.

Возможность внедрения автоматических систем контроля и управления процессом, объединенных в единый мехатронный комплекс, оказывается особенно важной для взрывоопасных и вредных производств. Установка приборов для контроля уровня, цвета, качества, концентрации реагентов в оборудовании (машине или аппарате) и поддержание этих параметров в заданных пределах без участия человека многократно повышает безопасность и стабильность производства. Помимо повышения безопасности, автоматическое регулирование обеспечивает работу оборудования в оптимальных

режимах, адаптивно подстраиваясь под меняющиеся условия, что способствует повышению производительности аппаратуры и качества продукта, а также снижению расходных коэффициентов.

Полная автоматизация, включающая автоматический контроль и автоматическое управление, является наиболее целесообразной формой технологического оформления производства в химической промышленности, поскольку только исключение участия людей может обеспечить наибольшую надежность и безопасность работы. Вибрационная техника предоставляет эту возможность, а достижения в современном развитии электроники и электромеханики позволяют говорить о больших перспективах развития этого направления [13], [14].

Заключение

В настоящее время в российской промышленности можно выделить две проблемы: нехватка трудовых ресурсов и снижение энергопотребления технологическим оборудованием.

Очевидно, что в течение ближайшего времени проблему нехватки трудовых ресурсов за счет, например, повышения рождаемости решить не удастся. Единственный путь – повышение производительности технологического оборудования. Это может быть достигнуто в результате разработки рационального человеко-машинного интерфейса, отдаляющего оператора от объекта труда и позволяющего увеличить количество единиц одновременно обслуживаемого оборудования. Автоматическая диагностика или самодиагностика работоспособности узлов оборудования резко снижает вероятность случайных отказов, а модульный принцип построения обеспечивает оперативный ремонт.

Энергосбережение при разработке технологического оборудования осуществляется за счет применения менее энергоемких технологий, в частности, на основе вибрационной техники в результате снижения массы подвижных деталей и моментов инерции вращающихся деталей.

Повышенная конкурентоспособность мехатронного оборудования по сравнению с традиционным оборудованием обеспечивается, прежде всего, самой идеологией проектирования. Исключение возможности быстрого копирования обеспечивается за счет разработки специализированных систем управления, размещенных в едином конструктивном исполнении со всеми остальными составными частями оборудования.

Внедрение в химическую технологию достижений из области вибрационной техники позволит значительно повысить интенсивность и эффективность процессов переработки жидких сред и сыпучих материалов. Взаимно интегрированные вибрационный электромеханический модуль, модуль диагностики, сбора и анализа данных и система управления образуя мехатронную единицу должны стать неотъемлемой частью современного технологического комплекса химического предприятия, гарантируя его надежность и безопасность.

Для достижения желаемого потребуется не только решить ряд остро стоящих проблем внедрения вибрационной техники нового поколения, но и разработать рекомендации по проектированию как отдельных составных модулей, так и всего технологического комплекса в целом.

Результаты работ в этом направлении, полученные в последние два десятилетия на кафедре мехатронных технологических комплексов Санкт-Петербургского государственного технологического института, позволяют говорить о принципиальной возможности реализации и превращения в жизнь всего вышеизложенного, причем в очень близкой перспективе.

Список источников

1. Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс. / Под ред. В. Г. Айнштейн. СПб.: Лань. 2019. 910 с.

2. Химико-технологические агрегаты смешивания дисперсных материалов / А. Н. Веригин, В. Г. Джангирян, Н. М. Вареных, М. В. Емельянов. СПб., 2000. 336 с.

3. *Мелюшев Ю. К.* Основы автоматизации химических производств и техника вычислений: учебник для техникумов. 2-е изд., перераб и доп. М.: Химия, 1982.

4. *Карпов К. А.* Основы автоматизации химических производств: учеб. пособие. СПб.: СПбГИЭУ, 2004. 92 с.

5. *Попов Ю. В., Корчагина Т. К., Лобасенко В. С.* Химические реакторы. (Теория химических процессов и расчет реакторов): учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Волгоград, 2015. 240 с.

6. *Смирнов Н. Н., Волжинский А. И.* Химические реакторы в примерах и задачах. СПб., 1994. 280 с.

7. *Коробчук М. В., Веригин А. Н.* Высокие технологии и инновации в технике: сб. избранных статей Междунар.науч. конф. (Санкт-Петербург, сентябрь 2021 года). СПб.: ГНИИ «Нацразвитие», 2021. С. 94–97.

8. *Коробчук М. В., Веригин А. Н.* Обзор современных вибрационных смесителей сыпучих материалов и тенденции их развития // Южно-Сибирский научный вестник. 2020. № 4 (32). С. 32–45.

9. *Коробчук М. В., Веригин А. Н.* Конструкции мешалок вибрационных перемешивающих устройств / М.В. Коробчук, А.Н. Веригин // Химическая промышленность сегодня. 2021. № 5. С. 46–55.

10. *Коробчук М. В., Веригин А. Н., Дедов Н. А.* Смешивание дисперсных материалов при наложении нелинейных колебаний // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2013. № 18(44). С. 56–60.

11. *Коробчук М. В., Веригин А. Н., Джангирян В. Г.* Вибрационная обработка многокомпонентных энергонасыщенных материалов: новые возможности // Вестник Технологического университета. 2019. Т. 22. № 11. С. 74–80.

12. *Коробчук М. В., Веригин А. Н.* Использование программных средств и электронных компонентов, применительно к проектированию мехатронных вибрационных установок // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: Материалы IV Междунар. научно-практ. конф. Комсомольск-на-Амуре, 16–26 февраля 2021 года. Комсомольск-на-Амуре, 2021. С. 212–216.

13. *Коробчук М. В., Веригин А. Н.* Мехатронный химико-технологический комплекс, как объект исследования и проектирования // Interdisciplinary research: past experience, present opportunities, future strategies: Collection of articles XVII International Scientific and Practical Conference. Melbourne: ICSRD «Scientific View». 2022. P. 72–90.

14. *Коробчук М. В., Веригин А. Н., Мазур А. С.* Особенности подготовки инженеров-механиков мехатронных комплексов химико-технологического назначения // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2022. № 33. P. 77–84.

УДК 62-523 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-140-144**

А. В. Мальчиков*
кандидат технических наук, доцент
Б. В. Лушников*
кандидат технических наук, доцент
**Юго-Западный государственный университет*

РОБОТИЗИРОВАННОЕ УСТРОЙСТВО ПОДЛЕДНОГО МОНИТОРИНГА ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрена возможность применения колесного мобильного робота для мониторинга подводных объектов водоемов с ледяным покровом. Предложены пути технической реализации устройства с указанными функциональными возможностями, разработана расчетная схема и математическая модель, позволяющая выявить закономерности влияния параметров устройства на эффективность подледного перемещения.
Ключевые слова: *подводный мониторинг, плавающий робот, колесный робот, подледный робот, математическое моделирование.*

A. V. Malchikov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
B. V. Lushnikov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**South-West State University*

ROBOTIC DEVICE FOR UNDER-ICE MONITORING OF UNDERWATER OBJECTS

The possibility of using a wheeled mobile robot for monitoring underwater objects in ponds with ice cover is considered. Ways of technical implementation of the device with the indicated functionality are proposed, a calculation scheme and a mathematical model are developed that allow revealing the regularities of the influence of device parameters on the efficiency of under-ice movement.
Keywords: *underwater monitoring, floating robot, wheeled robot, under-ice robot, math modeling.*

Немалая часть водной поверхности земного шара определенную часть времени года (постоянно или периодически) покрыта льдом, причем как в северном, так и в южном полушарии. Часть территории Земли, примыкающей к Северному полюсу и включающей почти весь Северный Ледовитый океан с островами, а также окраины материков Евразии и Северной Америки, называется Арктикой, и тут ледяной покров сохраняется в течение всего года. В этих условиях остается актуальным выполнение целого ряда задач, которые рационально осуществлять с применением средств робототехники: проведение мониторинга подводных технологических объектов, осмотр подводных конструкций, портовых сооружений, опор мостов, плотин и т. д.; проверка целостности подводных трубопроводов, кабелей связи, качества воды; поиск источников ее загрязнения; поддержка аварийно-спасательных и поисково-осмотровых работ; оценка, поиск и наблюдение за водными биоресурсами и многое другое [1]–[3].

Большинство существующих роботов, выполняющих указанные виды работ, перемещаются в толще воды или по дну. Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) могут использовать как винтовые движители [4], [5], так и бионические принципы движения [6], [7].

Управляемое движение АНПА, его точное позиционирование или удержание требуемого положения при наличии течений или других внешних воздействий является сложной, но необходимой задачей при проведении высокоточных работ и измерений или съемок с большой выдержкой в условиях ограниченной видимости. Все это требует также дополнительных энергозатрат в тяговых электроприводах и значительно усложняет процессы управления и стабилизации [8], [10].

Одним из вариантов обеспечения устойчивого положения робота под водой является закрепление устройства на грунте, при этом роботу необходимо решать задачи погружения/всплытия, а также учитывать особенности рельефа

дна водоема. В некоторых случаях, например, при наличии растительности на дне или мягкого неустойчивого грунта выполнение подобной операции при решении задач мониторинга невозможно.

Еще одним вариантом фиксации объекта под водой на заледеневшем водоеме является закрепление непосредственно на внутренней поверхности льда [11]–[13]. Таким образом, используя границу раздела сред вода – лед, робот может, не используя дополнительной энергии, сохранять свое положение под действием внешних сил. Кроме того, перемещение по льду имеет ряд неоспоримых преимуществ по сравнению с движением за счет гребных винтов: меньшие энергозатраты, простота и высокая точность позиционирования, за счет одометрии возможность передачи данных на поверхность и т. д.

Задача подледного перемещения сопряжена с необходимостью обеспечения хорошего сцепления с поверхностью льда за счет положительной плавучести и специализированных зацепов на движителях робота. В таком случае возможно использование как колесного привода с пневматическими колесами и глубоким протектором, которые обеспечивают запас плавучести и хорошую сцепляемость с поверхностью льда, так и гусеничного привода с полотном из легковесных синтетических материалов. Во втором случае для управления плавучестью потребуется дополнительные резервуары с вытесняемой при всплытии (поджатии к поверхности льда) водой. В рамках настоящей работы рассматривается вариант с колесным движителем и управляемой плавучестью за счет изменения давления в колесах.

Таким образом, задача роботизированного подводного мониторинга водоемов, покрытых льдом, например, на территории Арктической зоны организация управляемого движения подобных объектов, оптимизация параметров конструкции устройств – представляет собой интересную и актуальную научно-практическую задачу, требующую учета факторов среды и особенностей желаемого режима движения.

При создании робота для подледного мониторинга целесообразно использовать математическую модель устройства, позволяющую определить основные технические параметры устройства и системы управления, промоделировать движение устройства в различных режимах и при различных характеристиках ледовой поверхности. В рамках настоящей работы предлагается оригинальная конструкция мобильного робота, принцип его перемещения, предложена математическая модель, позволяющая оценить возможности устройства и основные характеристики, влияющие на эффективность движения подо льдом.

Рассмотрим подробно конструкцию подводного робота для подледного перемещения, трехмерная модель которого показана на рис. 1.

Устройство представляет собой двухколесную платформу, состоящую из герметичного корпуса 1 и пары ведущих колес 2, приводимых в движение независимыми электроприводами 8. Помимо колес, корпус робота удерживается на поверхности льда скользящими упругими опорами 3, расположенными в задней части корпуса. Внутри корпуса расположены основные компоненты устройства: емкость со сжатым воздухом, платы управления и навигации 5, аккумуляторные батареи 6, пневматические

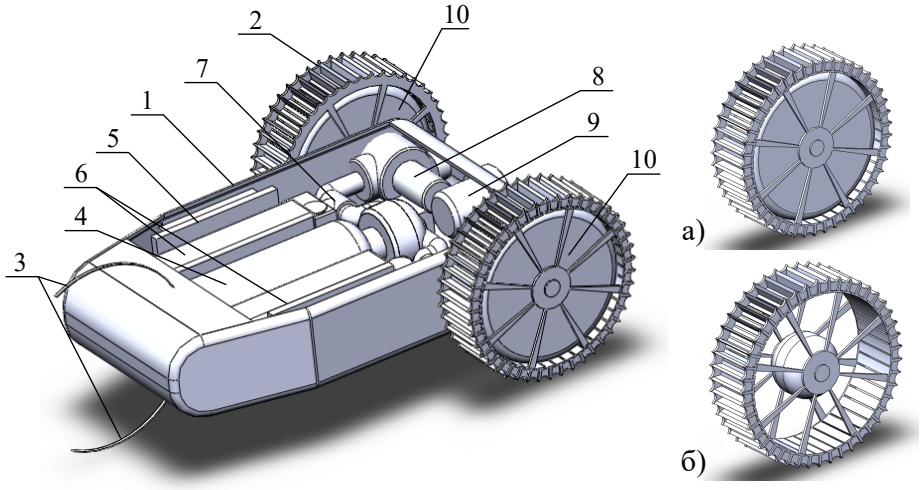


Рис. 1. 3D-модель прототипа подледного робота: а – колесо робота с заполненным колесным баллоном; б – колесо робота с незаполненным колесным баллоном

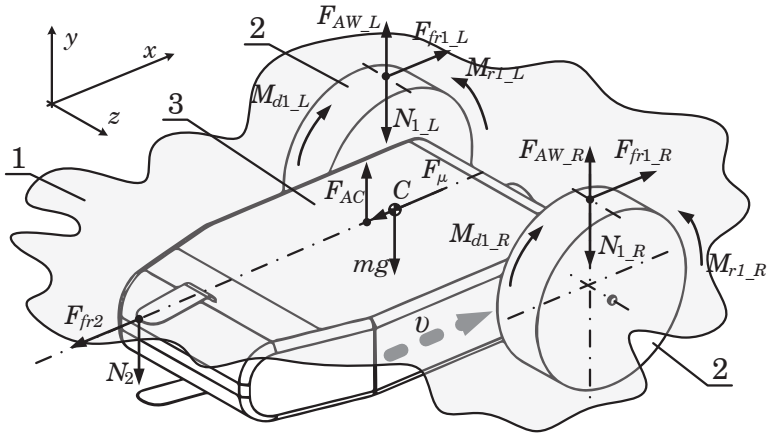


Рис. 2. Расчетная схема подледного робота:
1 – нижняя поверхность ледового покрова; 2 – ведущие колеса; 3 – корпус робота

клапаны 7, управляющие давлением внутри колесных баллонов 10, навесное оборудование 9. Для управления плавучестью робота используются резервуары, представляющие собой деформируемые резиновые баллоны, которые могут наполняться воздухом из резервуара высокого давления, увеличиваясь в объеме (рис. 1*а*) или сжимаясь при стравливании воздуха из них (рис. 1*б*).

Операция мониторинга осуществляется следующим образом. Робот доставляется до проема в ледяном покрове либо движется своим ходом под управлением оператора. Далее робот погружается в воду. Так как в этот момент воздух из колесных баллонов стравлен, то робот имеет нейтральную плавучесть и по инерции уходит под лед. Затем робот закачивает из емкости воздух в колесные баллоны, которые увеличиваются в объеме, изменяя общую плавучесть. Робот под действием силы Архимеда всплывает и упирается в лед колесами и хвостовым упором. Далее задействуются электроприводы колес, которые и перемещают устройство вдоль заданной заранее траектории или согласно командам оператора.

В процессе движения робота можно управлять как величиной плавучести, а значит, нормальными реакциями и силами сцепления в зоне контакта колес со льдом, изменяя давление в баллонах, так и крутящим моментом, а также скоростью вращения ведущих колес для реализации требуемого режима перемещения. При анализе возможностей конструкции важнейшую роль играет оценка процессов взаимодействия робота с поверхностью льда: сил трения качения, обусловленных наличием выступов-грунтозацепов на поверхности колеса, и сил трения сцепления на ведущих колесах, обеспечивающих перемещение робота.

При разработке математической модели нижнюю поверхность льда будем считать недеформируемой шероховатой плоской поверхностью, колеса и опоры также считаем недеформируемыми, однако в модели учитывается момент трения качения, зависящий от геометрических параметров грунтозацепов.

На рис. 2 показана пространственная расчетная схема подледного робота в процессе перемещения за счет колесного привода.

На данной схеме показаны основные силы, действующие на робота: F_{AC}, mg – приведенные силы Архимеда и тяжести корпуса робота с колесами со спущенными колесными баллонами; F_{AW_L} и F_{AW_R} – силы Архимеда, обусловленные объемом колесных баллонов; N_{1_L}, N_{1_R}, N_2 – нормальные реакции в точках контакта левого, правого колеса и задней опоры соответственно; F_{fr1_L}, F_{fr1_R}, – силы сцепления ведущих колес; F_{fr2} – сила трения скольжения задней опоры; M_{d1_L}, M_{d1_R} –моменты электропривода левого и правого колеса соответственно; M_{r1_L}, M_{r1_R} – моменты сил трения качения колес; F_μ – сила вязкого сопротивления движению, зависящая от площади лобового сечения и обтекаемости робота.

Согласно принятой расчетной схеме центр масс устройства располагается в точке C и смещен относительно центра объема конструкции, за счет чего и обеспечивается наклонное (колесами вниз) нейтральное положение под водой. Однако после накачки колесных баллонов и создании дополнительных сил Архимеда робот прижимается к нижней поверхности льда, обеспечивая требуемые нормальные реакции и силы сцепления, необходимые для возможности движения. Отметим, что при изменении объема колесных баллонов результирующая

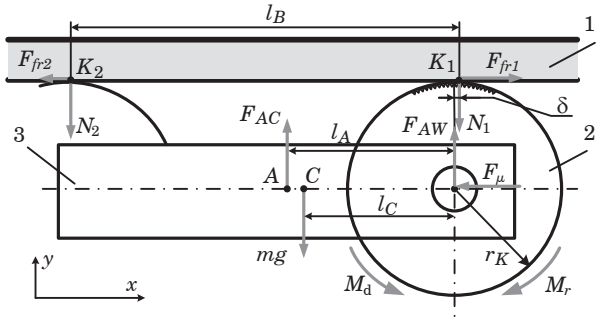


Рис. 3. Плоская расчетная схема подледного робота: 1 – ледовый покров; 2 – ведущие колеса; 3 – корпус робота

сила Архимеда смещается в переднюю часть робота, но не достигает оси вращения ведущих колес, чтобы не допустить разворот корпуса под действием моментов привода и сил трения в точках контакта колес с поверхностью льда.

Для более наглядного и подробного рассмотрения соотношения сил и создаваемых ими моментов перейдем к плоской схеме (рис. 3) движения робота по нижней поверхности льда водоема.

При рассмотрении плоской задачи при обозначении соответствующих сил и моментов не будем указывать индексы левого и правого колеса. Так как система симметрична, будем считать, что показанные на рис. 3 силы и моменты представляют собой сумму сил и моментов для левого и правого колес.

На рис. 3 введены следующие линейные расстояния: l_B – расстояние между точками контакта робота с поверхностью льда K_1 и K_2; l_C – расстояние от оси вращения ведущих колес до центра масс C; l_A – расстояние от оси вращения ведущих колес до центра приложения силы Архимеда A; r_K – радиус ведущих колес робота.

Согласно расчетной схеме, показанной на рис. 3, можем записать выражения для нормальных реакций, возникающих в точках контакта, следующим образом:

$$N_1 = F_{AC}\left(1-\frac{l_A}{l_B}\right)+F_{AW}-mg\left(1-\frac{l_C}{l_B}\right); \quad (1)$$

$$N_2 = F_{AC}\frac{l_A}{l_B}-mg\frac{l_C}{l_B}. \quad (2)$$

Анализ данных формул позволяет понять, что увеличение объема баллонов в колесах, а значит и архимедовой силы F_{AW}, приводит к увеличению реакции N_1 ведущих колес, что необходимо для создания сил сцепления и движения объекта по поверхности льда.

Движение подледного робота может быть описано нелинейным дифференциальным уравнением

$$m\ddot{x} = F_{fr1} - F_{fr2} - F\mu, \quad (3)$$

где F_{fr1} – сила трения сцепления ведущих колес с поверхностью льда, которая определяется выражением

$$F_{fr1} = \begin{cases} \dfrac{1}{r_K}\left(M_d(t)-M_r\right) \\ \text{если}\left(f_1N_1r_K \ge M_d(t)-M_r\right), \\ \dfrac{1}{r_K}\left(f_1N_1r_K-M_r\right) \\ \text{если}\left(f_1N_1r_K < M_d(t)-M_r\right), \end{cases} \quad (4)$$

где f_1 – коэффициент трения сцепления колеса; $M_d(t)$ – крутящий момент на колесе, развиваемый приводной системой робота; $M_r=\delta N_1$ – момент трения качения (δ – коэффициент трения качения колеса); $F_\mu=\mu V^2$ – сила вязкого сопротивления среды (V – линейная скорость робота); $F_{fr2}=f_2N_2$ – сила трения скольжения задней опоры (f_2 – коэффициент трения скольжения).

Для моделирования влияния параметров устройства на его динамику необходимо выполнить численное интегрирование дифференциального уравнения (3) с учетом выражений (1), (2) и (4), задавая крутящий момент на ведущих колесах робота как функцию времени. Крутящий момент может задаваться как ступенчатой функцией, так и плавным законом, реализованным, например, с помощью полиномиальной функции или функции гиперболического тангенса в виде

$$M_d(t) = M_{\max}\frac{e^{kt}-e^{-kt}}{e^{kt}+e^{-kt}}, \quad (5)$$

где k – постоянная времени, характеризующая темп выхода на максимальное.

В работе предложена конструкция колесного робота для мониторинга подводных объектов в водоемах, покрытых льдом. Предлагаемый способ движения по внутренней поверхности льда обеспечивается управляемой положительной плавучестью робота, достигаемой за счет использования колесных баллонов с изменяемым объемом.

Для выявления закономерностей влияния различных параметров системы на эффективность движения подо льдом была разработана математическая модель устройства, позволяющая проанализировать влияние коэффициентов сцепления, значения сил Архимеда, а также

крутящего момента на колесах на динамику движения робота.

Статья подготовлена при поддержке Стратегического проекта «Приоритет-2030. Создание робототехнических средств для расширения функциональных возможностей человека».

Список источников

1. *Bogue R.* Underwater robots: a review of technologies and applications. Industrial Robot // An International Journal. 2015.

2. *Shkurti F., Xu A., Meghjani M.* Multi-domain monitoring of marine environments using a heterogeneous robot team // 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2012. P. 1747–1753.

3. *Lee D., Kim G., Kim D.* Vision-based object detection and tracking for autonomous navigation of underwater robots // Ocean Engineering. 2012. N 48. P. 59–68.

4. *Бочаров Л.* Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития. Ч. 2 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2009. № 8. С. 88–93.

5. *Яцун С. Ф., Политов Е. Н., Безмен П. А.* Автономный подводный плавающий робот с геопозиционированием // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины. 2016. С. 288–299.

6. *Лушников Б. В., Политов Е. Н., Тарасова Е. С.* Бионический плавающий робот для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере // Cloud of science. 2014. № 1. С. 62–78.

7. *Yatsun S., Lushnikov B., Politov E.* Underwater floating robot-fish: a comparative analysis of the results of mathematical modelling and full-scale tests of the prototype // MATEC Web of Conferences. 2017. P. 02014.

8. *Vasilescu I., Kotay K., Rus D.* Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network // Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems. 2005. P. 154–165.

9. *Yuh J., West M.* Underwater robotics //Advanced Robotics. 2001. Vol. 15. N 5. P. 609–639.

10. *Whitcomb L. L.* Underwater robotics: Out of the research laboratory and into the field // Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. Vol. 1. P. 709–716.

11. *Цыфанский С. Л.* Новый способ движения на границе природных сред подледный транспортный аппарат // Наука, техника и образование. 2015. № 4 (10). С. 43–49.

12. *Berisford D., Leichty J., Klesh A.* Buoyant Rover for Under-Ice Exploration // AGU Fall Meeting Abstracts. 2012. Vol. 2012. P. C13E-0655.

13. *Berisford D., Leichty J., Klesh A.* Remote under-ice roving in Alaska with the buoyant rover for under-ice exploration // AGU Fall Meeting Abstracts. 2013. Vol. 2013. P. C13C-0684.

УДК 62-51 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-145-148**

Е. В. Савельева*
инженер, младший научный сотрудник
О. Г. Локтионова*
доктор технических наук, профессор
Е. Н. Политов*
кандидат технических наук, доцент
**Юго-Западный государственный университет*

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ

Одной из важных задач является обеспечение максимальной автономности выполнения работ промышленными робототехническими системами, что предполагает их самостоятельное перемещение в пределах отведенного участка и выполнение заданных действий. Объектом исследования выбрана мобильная роботизированная трехколесная платформа (МРП) для локальной доставки грузов, обладающая высокой маневренностью. Рассмотрена структурная схема системы автоматического управления (САУ), схема и характер организации обратной связи в процессе человеко-машинного взаимодействия.
Ключевые слова: *мобильная роботизированная платформа (МРП), система автоматического управления (САУ), человеко-машинный интерфейс (ЧМИ).*

E. V. Saveleva*
Engineer, Junior Researcher
O. G. Loktionova*
Dr. Sc. Tech., Professor
E. N. Politov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**South-West State University*

MOVEMENT CONTROL ALGORITHM FOR A MOBILE ROBOTIC PLATFORM

One of the important tasks is to ensure maximum autonomy of work by industrial robotic systems, which involves their independent movement within the allotted area and the performance of specified actions. The object of the study is a mobile three-wheeled robotic platform (MRP) for local delivery of goods, which has high maneuverability. The block diagram of the automatic control system (ACS), the scheme and nature of the organization of feedback in the process of human-machine interaction are considered.
Keywords: *mobile robotic platform (MRP), automatic control system (ACS), human-machine interface (HMI).*

Для повышения конкурентоспособности различных отраслей промышленности в настоящее время особое значение приобретает автоматизация, роботизация процессов локальной доставки полезных грузов [5], [6], [9]. Полезный эффект от применения робототехнических систем заключается в увеличении темпов производства, снижении трудоемкости и стоимости работ, повышении их качества и безопасности, облегчении условий труда рабочих. Объектом исследований настоящей работы является управляемая динамическая система – трехколесный робот с двумя независимо моторизованными ведущими колесами. Схема управления трансмиссией МРП приведена на рис. 2.

Тип организации движения, предполагающий применение двух независимых ведущих колес и двух вращающих их двигателей, является одним из наиболее перспективных в силу того, что обеспечивает максимальную маневренность МРП [1], [3]–[7], [10]. Выбранная кинематическая схема позволяет осуществлять поворот на месте или при минимальном радиусе. Кроме того, отсутствие ограничений в повороте ведущих колес вокруг вертикальной оси позволяет осуществлять движение МРП параллельно препятствию в случае отсутствия возможности разворота, что особенно важно для решения многих практических задач [5], [6].

На рис. 2 представлена схема системы управления МРП. Оператор выполняет загрузку плана участка в бортовую систему управления (БСУ) МРП, а МРП интегрируется в технологический процесс, получая информацию с гори-

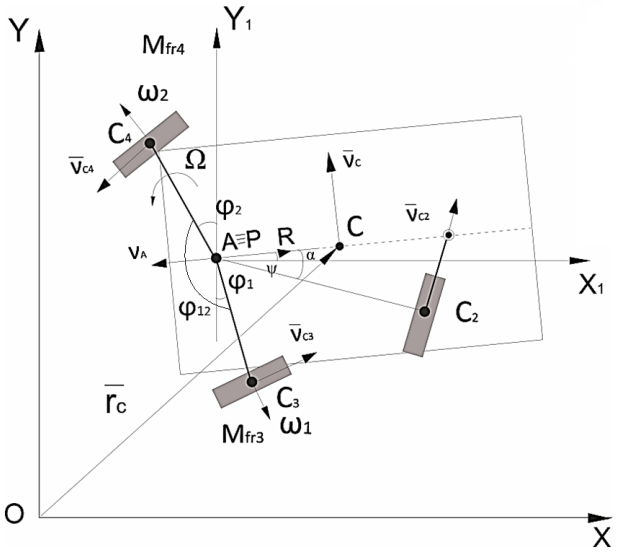


Рис. 1. Схема организации движения трехколесного робота с двумя управляемыми колесами и одним ведомым колесом 1 – корпус МРП; 2 – рояльное колесо; 2, 3 – управляемые колеса (при выполнении поворота на месте вокруг точки А)

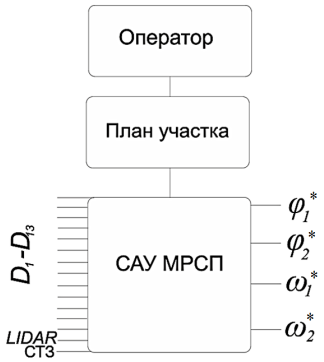


Рис. 2. Структурная схема системы управления МРП

зонтальных и вертикальных дальномеров $D_{1–13}$, LIDAR и СТЗ, исключая функциональное участие человека в процессе достижения роботом заданной точки.

Для реализации автоматического управления рассматриваемая платформа оснащена группой устройств, принимающих информацию из внешней среды. В эту группу входят:

– 3D-сенсор высокого разрешения типа LIDAR;

– система технического зрения (СТЗ);

– система вертикальных и горизонтальных дальномеров ($D_{1–12}$);

– датчик контактного взаимодействия D_{13}.

Особенность обслуживания внутренних помещений, тоннелей строящихся объектов и действующих промышленных зон связана с невозможностью использования ГЛОНАСС/GPS навигации и недостаточная точность подобных систем в описанных условиях. Для реализации локальной навигации и обеспечения самостоятельного перемещения робота необходимо учитывать характерные черты производственных территорий:

– низкоскоростной режим движения;

– ограниченная площадь территории;

– наличие статических объектов в виде стен, лесов, колонн, паллет, производственного оборудования, вертикальных и горизонтальных проемов;

– наличие движущихся объектов.

Циклический алгоритм системы управления роботом, учитывающий работу системы сенсоров робота, представлен на рис. 3.

Задача управления состоит в переводе объекта из исходного состояния в требуемое конечное, минуя все недопустимые и нежелательные области, проходя через последовательность (не всегда упорядоченную) требуемых промежуточных состояний [2], [8].

После задания плана участка и ключевых точек оператором МРП самостоятельно определяет оптимальный путь к ближайшей заданной точке. Движение рассматриваемой системы по заданной площадке характеризуется наличием так называемых точек бифуркации, в которых единственность решения нарушается. Таким образом, благодаря работе вертикальных и горизонтальных дальномеров и LIDAR обнаруживаются статические и динамические препятствия, не нашедшие отражение в начальном плане. Работа БСУ МРП включает обработку информации, поступающей с этих устройств с целью редактирования и перестроения траектории.

Начальный набор опорных точек, необходимых для достижения МРП, задается оператором. Траектория движения МРП на промежуточных участках между опорными точками выбирается машиной самостоятельно и редактируется бортовой системой управления (БСУ) при необходимости обхода препятствий, для обнаружения которых используется СТЗ и LIDAR, вертикальные и горизонтальные дальномеры. Функциями СТЗ является распознавание опорных реперов-ориентиров, размещенных в заранее заданных зонах помещений. На этапе задания оператором карты обслуживаемого участка, информация, получаемая с СТЗ, необходима для инициализации локального местоположения аппарата. По мере продвижения устройства по траектории функционирует LIDAR, который определяет препятствия и их границы. С использованием информации с LIDAR траек-

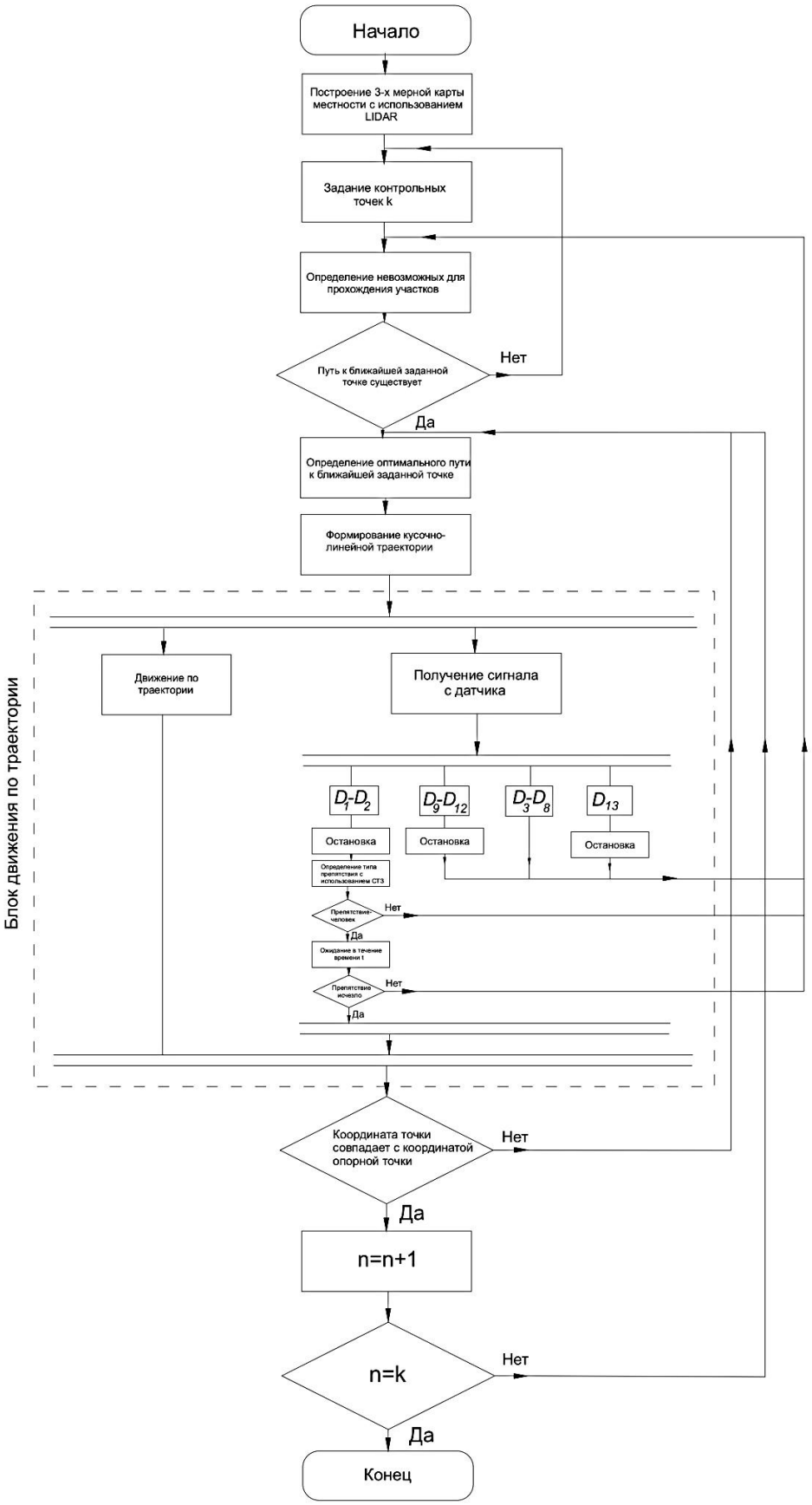


Рис. 3. Циклический алгоритм системы автоматического управления МРП

тория движения робота самостоятельно редактируется БСУ МРП, выполняется обход объекта. В этот момент информация, поступающая в БСУ через канал СТЗ, позволяет идентифицировать объект, мешающий прямому прохождению по первоначально запланированной траектории. В случае идентификации рабочего на пути МРП платформа совершает временную остановку, при исчезновении препятствия продолжает движение по первоначальной траектории.

Заключение

Создание и внедрение роботизированных устройств в промышленное производство является актуальной научно-исследовательской задачей. Эффективность применения МРП при транспортировке грузов на линейно-протяженных объектах с точки зрения автоматизации процессов доставки и минимизации физических затрат рабочих не вызывает вопросов. Предложенная схема МРП благодаря четырехканальному управлению обладает высокой мобильностью и при малых габаритах позволяет снижать трудоемкость производственных процессов при работе на линейно протяженных и многоэтажных объектах. Рассмотрена схема системы автоматического управления МРП, а также схема внедрения оператора в технологический процесс и организация обратной связи в процессе человеко-машинного взаимодействия. Приведено кинематическое описание движения платформы МРП. В дальнейших исследованиях планируется провести более подробное кинематическое описание движения МРП. Полученные результаты позволят комплексно подойти к разработке системы автоматического управления роботом.

Исследование выполнено при поддержке Стратегического проекта «Приоритет-2030. Создание робототехнических средств для расширения функциональности человека».

Список источников

1. *Jaskot A., Posiadała B.* Analysis of motion of the three wheeled mobile platform // MATEC Web of Conferences. Vol. 157. P. 01008.

2. *Toda M., Kitani O., Okamoto T.* Navigation method for a mobile robot via sonar-based crop row mapping and fuzzy logic control. Journal of Agricultural Engineering Research Vol. 72 (4). P. 299–309.

3. *Takei T.* Baggage transportation and navigation by a wheeled inverted pendulum mobile robot //IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2009. Vol. 56. N 10. P. 3985–3994.

4. *Yun D.* Kinematics and Dynamic Modeling and Simulation Analysis of Three-wheeled Mobile Robot // 2016 MDM International Conference on Mechanics Design, Manufacturing and Automation.

5. *Афонин Д. В., Политов Е. Н., Яцун С. Ф.* Роботизированная платформа для перемещения самолетов по аэродрому // Прогресс транспортных средств и систем-2018 СПб., 2018. Р. 190–191.

6. *Бартенев В. В., Яцун С. Ф.* Управление движением мобильных колесных роботов по сигналу оптронной матрицы // XVII Санкт-Петербургская междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб., 2018. Р. 232–237.

7. *Бартенев В. В.* Динамика управляемого движения мобильного робота с двумя независимыми ведущими колесами. Курск, 2010.

8. *Петров В. Ф., Симонов С. Б., Терентьев А. И.* Сетевая структура обработки информации в распределенных системах управления наземными робототехническими комплексами // Известия вузов. Электроника. 2018. Т. 23. № 4. С. 389–398.

9. *Савельева Е. В.* Роботизированные системы для укладки мелкоштучных элементов при возведении стен малоэтажных жилых зданий // Наука молодых – будущее России. 2017. С. 160–163.

10. *Семыкина И. Ю., Григорьев А. В., Гаргаев А. Н.* Подходы к созданию роботизированного проходческого комбайна в условиях безлюдной шахты. Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017. 2017. С. 202–205.

УДК 007.51 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-149-154**

А. С. Яцун*
кандидат технических наук, доцент
Я. С. Никулин*
студент
Е. Р. Логунов*
студент
**Юго-Западный государственный университет*

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭКЗОСКЕЛЕТНЫХ СИСТЕМ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В проведении опытно-промышленных испытаниях на пяти технологических операциях предприятий пищевой промышленности показаны отличия и особенности внедрения и применения промышленных экзоскелетов, их влияние на производительность и общее состояние испытуемых. По результатам испытаний технологические операции разделены на четыре подгруппы: такелажные работы с грузами до 20 кг, более 20 кг, на полный рабочий день, на не полный рабочий день. Сравнение результатов демонстрирует изменение общего впечатления испытуемых от использования промышленного экзоскелета и производительности труда в зависимости от массы грузов и времени работ.
Ключевые слова: *вертикальное положение тела, эластомер, промышленный экзоскелет, компенсация, разгрузочный жилет.*

A. S. Yatsun*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
Y. S. Nikulin*
Student
E. R. Logunov*
Student
**South-West State University*

EXPERIENCE IN THE IMPLEMENTATION OF INDUSTRIAL EXOSKELETON SYSTEMS IN THE FOOD INDUSTRY

In conducting pilot tests on two technological operations of food industry enterprises, the differences and features of the introduction and use of industrial exoskeletons and their impact on the performance and general condition of the subjects are shown. According to the test results, technological operations are divided into 4 subgroups: rigging work, with loads up to 20 kg, more than 20 kg, full-time, not full-time. Comparison of the results demonstrates a change in the overall impression of the subjects from the use of an industrial exoskeleton and labor productivity depending on the weight of cargo and the time of work.
Keywords: *vertical body position, elastomer, industrial exoskeleton, compensation, unloading vest.*

Профессиональная заболеваемость, связанная с воздействием физических перегрузок и перенапряжением отдельных органов и систем, в 2018 году заняла по-прежнему второе ранговое место в структуре профессиональной патологии в зависимости от воздействующего вредного производственного фактора и составила 24,7 % [5]. При этом на сегодняшний день отсутствуют средства индивидуальной защиты (СИЗ), способные предотвратить неблагоприятное воздействие тяжести трудового процесса на опорно-двигательный аппарат (ОДА) работника. В связи с этим перспективным направлением является внедрение промышленных экзоскелетов (ПЭ), способных защитить ОДА работника от физических перенапряжений. Когда речь заходит о травматизме на рабочем месте, чаще всего упоминают самые заметные примеры, приводящие к гибели или инвалидности, но они достаточно редки [7]. Травмы обычно происходят при перемещении грузов средней тяжести. При выполнении такой монотонной и сравнительно простой работы работники в большей степени подвержены эффекту привыкания: ощущение понятности и простоты выполняемых действий создает напрасную уверенность в безопасности. В сочетании с накопившейся усталостью это приводит к ошибкам, которые

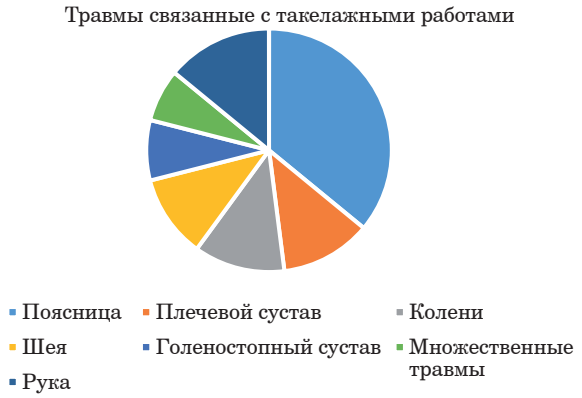


Рис. 1. Диаграмма: риск травм во время выполнения технологических операций, связанных с подъемом и спуском груза средней тяжести

дорого стоят. По данным за 2019 год, отечественные работодатели выплатили за травмы на рабочем месте ₽12 млрд. Более подробная статистика по травмам в США свидетельствует, что 25 % всех компенсаций приходится на случаи, связанные с перенапряжением при перемещении объектов по поверхности, подъеме и бросании грузов; 36 % всех травм приходится на поясницу, а по 12 % – на плечевой пояс и колени. Это три наиболее уязвимые зоны при физическом труде [6].

Основным преимуществом применения экзоскелета по сравнению с любым типом системы автоматизации в том, что автоматизация идеально подходит для повторяющихся задач, люди необходимы для множества задач, требующих человеческих навыков, гибкости, восприятия и суждения [2].

Для изучения того, как промышленный экзоскелет влияет на производительность труда и общую усталость испытуемых при выполнении такелажных работ, были выбраны пять технологических операций на трех разных предприятиях и проведены тесты. Для тестов применялись промышленные экзоскелеты «Lowebacker» и «Holdupper» («Экзомед», Россия).

Первая технологическая операция представляет из себя подъем коробки 35 кг с конвейерной линии высотой 1 м, установка ее на поддон. Количество рядов на поддоне 6, количество испытуемых 4. Данная операция рассчитана на полный рабочий день. Испытания проводились с экзоскелетом «Lowebacker» (рис. 2).

Вторая технологическая операция похожа на предыдущую, но на другом участке производства. Подъем коробки 35 кг с конвейерной линии высотой 1,2 м, установка ее на поддон. Количество рядов на поддоне 6, количество испытуемых 2. Данная операция рассчитана на полный рабочий день. Испытания проводились с экзоскелетом «Holdupper» (рис. 3).

Третья технологическая операция представляет из себя перекладывания коробок 20 кг с од-

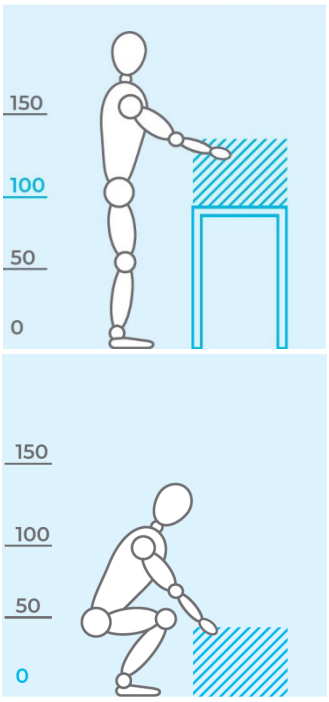


Рис. 2. Первая технологическая операция

Рис. 3. Вторая технологическая операция

ного поддона на другой. Высота забора груза 1,6 до 0,2 м, количество испытуемых 2. Данная операция рассчитана на неполный рабочий день. Испытания проводились с экзоскелетом «Lowebacker» (рис. 4).

Четвертая технологическая операция представляет из себя подъем груза 15 кг со стола, после его упаковки осуществляется спуск до поддона. Максимальная высота конструкции на поддоне 1,6 м, количество испытуемых 1. Данная операция рассчитана на неполный рабочий день. Испытания проводились с экзоскелетом «Lowebacker».

Пятая технологическая операция представляет из себя подъем груза 6 кг со стола высотой 0,8 м, установка груза в аппарат для вакуумации с последующим перекладыванием груза на следующий стол для дальнейшей упаковки. Данная операция рассчитана на полный рабочий день. Испытания проводились с экзоскелетом «Holdupper» (рис. 5).

Испытания происходили в два этапа, первый сбор данных после выполнения технологических операций без промышленного экзоскелета, второй сбор информации после выполнения технологических операций с промышлен-

Рис. 4. Третья технологическая операция

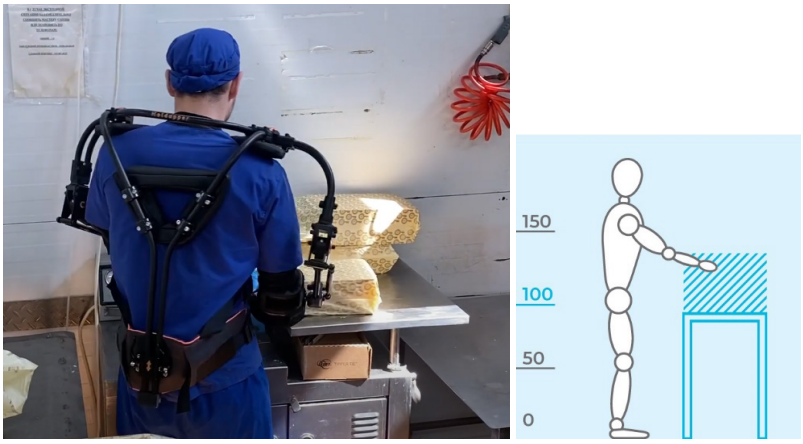


Рис. 5. Пятая технологическая операция

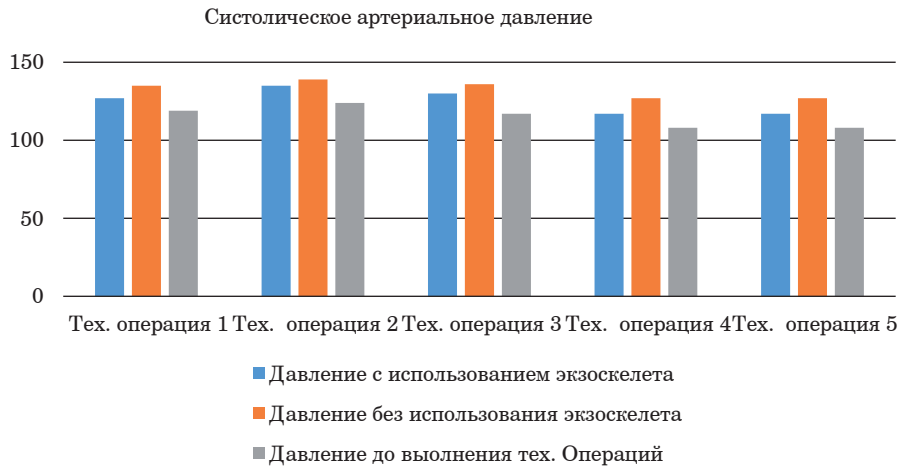


Рис. 6. Диаграмма: систолическое артериальное давление на технологических операциях

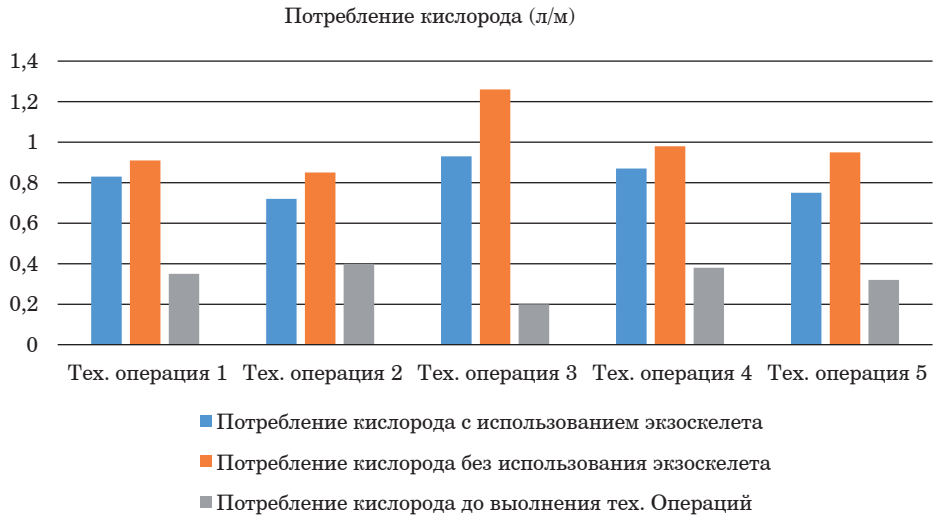


Рис. 7. Диаграмма: потребление кислорода на технологических операциях (л/м)

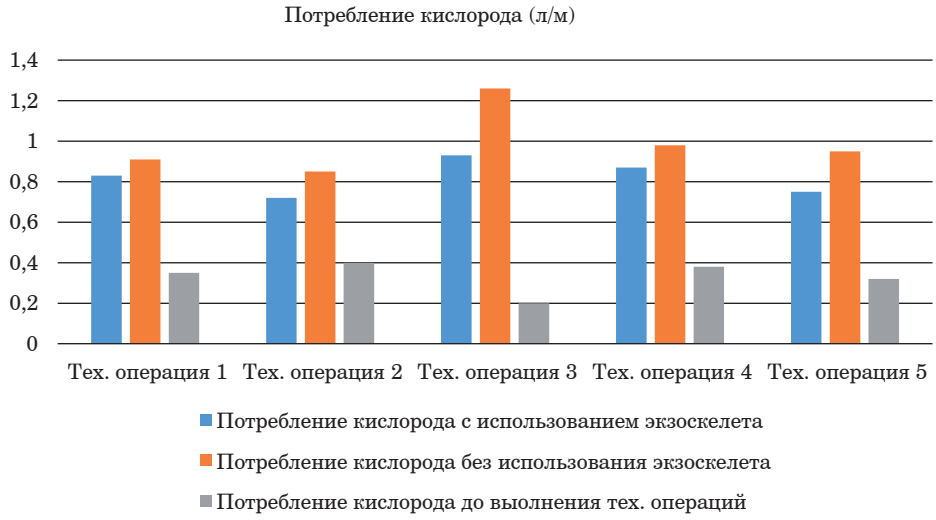


Рис. 8. Диаграмма: пульс на технологической операциях (уд/мин)

ным экзоскелетом (давление, пульс, уровень потребляемого кислорода).

Из полученных данных следует, что использование промышленных экзоскелетов на технологических операциях уменьшает общую усталость организма при выполнении такелажных работ. Также массогабаритные характеристики промышленных экзоскелетов не оказывают негативного влияния на организм человека, о чем свидетельствовали показатели состояния сердечно-сосудистой системы. Среднее снижение показателей (давление, пульс, уровень потребляемого кислорода) при использовании промышленных экзоскелетов составляет 15–20 %.

Следует отметить, что на операциях, которые рассчитаны на неполный рабочий день с грузами меньше 20 кг, общее впечатление от использования экзоскелета хуже, в отличие от операций, рассчитанных на полный рабочий день с грузами более 20 кг. Это доказывает нам тот факт, что промышленные экзоскелеты данного типа показывают лучшие результаты при выполнении работ в более длительные сроки с грузами более 20 кг.

Выводы

Таким образом, было установлено, что применение промышленных экзоскелетов Lowebacker и Holdupper является безопасным при выполнении производственных операций. Объективные данные, полученные в ходе исследования, показали, что использование экзоскелетов Lowebacker и Holdupper может способствовать снижению нагрузки на кардиореспираторную систему и опорно-двигательный аппарат человека, уменьшению уровня общего утомления и повышению работоспособности.

Список источников

1. *Bützer T., Lambercy O., Arata J.* Fully Wearable Actuated Soft Exoskeleton for Grasping Assistance in Everyday Activities. Soft Robotics April 2021.

2. Systematic Review of Back-Support Exoskeletons and Soft Robotic Suits Front Bioeng Biotechnol / A. Ali, V. Fontanari, W. Schmoelz, S. Agrawal. 2021; 9: 765257. Published online 2021 Nov 2.

3. *Development of a Soft Exosuit for Industrial Applications Y.* Kim, M. Xiloyannis, D. Accoto, L. Masia // 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (Biorob) 2018.

4. *Vries A., Looze M.* The Effect of Arm Support Exoskeletons in Realistic Work Activities: A Review Study // Journal of Ergonomics. 2019. Vol. 9 (4):255.

5. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2018 году: Государственный доклад. М., 2019. 254 с.

6. Экзоскелеты SuitX: опыт использования в реальных условиях. URL: https://top3dshop.ru/blog/exoskeleton-suitx-review.html (дата обращения: 15.01.2023).

7. Современные методы оценки безопасности и физиологической эффективности применения промышленных экзоскелетов / А. М. Герегей, Е. С. Шитова, И. С. Малахова и др.

8. Экзоскелеты – это новая необходимость. Почему российской промышленности придется их использовать? URL: https://vc.ru/tech/273882-ekzoskelety-eto-novaya-neobhodimost-pochemu-

rossiyskoy-promyshlennosti-pridetsya-ih-ispolzovat (дата обращения: 15.01.2023).

9. *Яцун С. Ф., Яцун А. С., Кореневский Н. А.* Опыт проектирования реабилитационных экзоскелетов // Медицинская техника. № 3 (303). С. 48–51.

10. *Ворочаева Л. Ю., Яцун А. С., Яцун С. Ф.* Управление квазистатической ходьбой экзоскелета на основе экспертной системы // Труды СПИИРАН. № 3 (52). С. 70–94

11. *Савин С. И., Яцун А. С., Яцун С. Ф.* Энергоэффективный алгоритм управления вертикализацией экзоскелета // Проблемы машиностроения и надежности машин. № 5. С. 108–113.

12. Моделирование управляемого движения человека при ходьбе в экзоскелете / С. Ф. Яцун, О. Г. Локтионова, Х. Х. М. Аль Манджи и др. Курск, 2019.

13. Anatomical Parameterisation As The Basis For Effective Work Of A Passive Exoskeleton Of The Upper Limbs Information Technology In Medical Diagnostics Iii / Vorobiev A., Andryushchenko F., Wójcik W. et al. // Metrological Aspects Of Biomedical Research. 2021.

14. *Zotov A., Valeev A., Sviridov A.* Exoskeleton Based On Elastic Hinges With A Given Characteristic For Passive Gravitational Compensation Of Heavy Objects Proceedings Of The 6th International Conference On Industrial Engineering (Icie 2020) Серия: Lecture Notes In Mechanical Engineering. Chelyabinsk, 2021.

15. *Song Q., Wu D.* A Compatible Design Of A Passive Exoskeleton To Reduce The Body – Exoskeleton Interaction Force Zhou Machines.

УДК 617.58 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-155-163**

С. М. Яцун*
доктор технических наук, профессор
А. Н. Рукавицын**
кандидат технических наук, доцент
**Курский государственный университет*
***Юго-Западный государственный университет*

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИОННОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ С СИМУЛЯТОРОМ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Создание современных устройств для обеспечения технологий нейрореабилитации на основе новейших инновационных методов – роботерапии с применением методов виртуальной реальности является актуальной задачей. Цель данной работы – разработка алгоритма функционирования управляющей программы реабилитационной роботизированной системы, учитывающего специфику ее конструкции и аппаратные особенности цифровой системы автоматического управления. Предложен управляющий алгоритм функционирования нейрореабилитационной роботизированной системы с симулятором виртуальной реальности, обеспечивающей принудительную разработку нижней конечности человека, позволяющий проводить исследования движений в голеностопном суставе. Результаты исследований использовались при разработке и исследовании возможных способов управления реабилитационной биомехатронной системы и позволяют реализовать наиболее функциональные режимы ее работы.
Ключевые слова: *виртуальная реальность, нейрореабилитация, компьютерная система управления, исполнительный модуль, структурная схема, роботизированная реабилитационная система.*

S. M. Yatsun*
Dr. Sc. Tech., Professor
A. N. Rukavitsyn**
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**Kursk State University*
***South-West State University*

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR THE FUNCTIONING OF A NEUROREHABILITATION ROBOTIC SYSTEM WITH A VIRTUAL REALITY SIMULATOR

The creation of modern devices to provide neurorehabilitation technologies based on the latest innovative methods – robotherapy using virtual reality methods is an urgent task.The purpose of this work is to develop an algorithm for the functioning of the control program of the rehabilitation robotic system, taking into account the specifics of its design and hardware features of the digital automatic control system. A control algorithm for the functioning of a neurorehabilitation robotic system with a virtual reality simulator that provides forced development of a person's lower limb, allowing for studies of movements in the ankle joint, is proposed. The results of the research were used in the development and research of possible ways of managing the rehabilitation biomechatronic system and allows implementing the most functional modes of its operation.
Keywords: *virtual reality, neurorehabilitation, computer control system, executive module, block diagram, robotic rehabilitation system.*

На сегодняшний день восстановление утраченных в результате травм или неврологических заболеваний некоторых функций человеческого организма осуществляется на основе специально разработанных методов нейрореабилитации с применением различных медицинских мероприятий. Данные мероприятия учитывают тот факт, что мозг человека является чрезвычайно пластичным органом и всегда адаптируется к новым условиям, в том числе и к тем, которые могут возникнуть после его повреждения. При этом основной задачей нейрореабилитации становится использование указанной способности человеческого мозга таким образом, чтобы его адаптация была обращена на восстановление утраченной функциональности [1], [2]. Среди современных технологий нейрореабилитации особое местно занимают

новейшие инновационные методы, такие как транскраниальная магнитная стимуляция, механотерапия, технологии, основанные на виртуальной реальности (VR-терапия) и пр.

В последние годы указанные методы были дополнены компьютеризованными робототехническими системами, которые на начальном этапе реабилитации обеспечивают пассивные движения конечностей, имитируя естественные движения, по мере восстановления двигательных функций увеличивают долю активного участия пациента в совершении локомоций. Одна из целей такой робототерапии заключается в преодолении патологических мышечных синергий, возникающих при попытке больного совершить какое-либо произвольное движение [3]–[5]. Расширение возможностей роботерапии может быть достигнуто погружением пациента в иммерсивную среду – виртуальную реальность, которая позволяет моделировать различные условия в зависимости от решаемых задач двигательной реабилитации [6], [7]. Данный метод основан на фундаментальных механизмах физиологии движения и обратной связи. При этом важным преимуществом системы виртуальной реальности является возможность установления обратной связи в режиме реального времени. Применение мультисенсорного взаимодействия пациента с объектами виртуальной реальности обеспечивает значительный реабилитационный эффект, вызывая изменения психоэмоционального состояния больного, которые регистрируются классическими нейрофизиологическими методами [8].

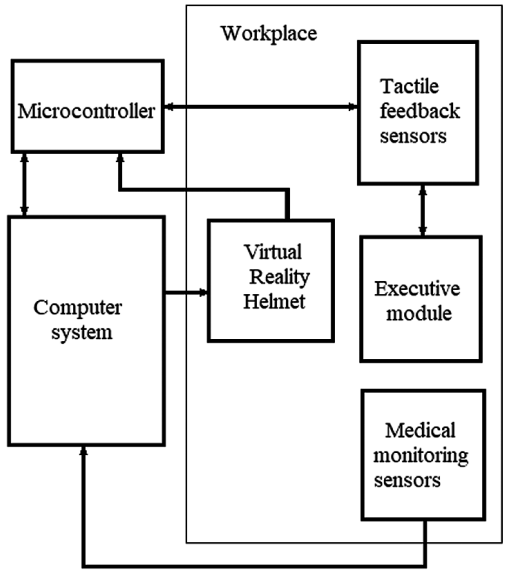


Рис. 1. Структурная схема реабилитационной системы с симулятором виртуальной реальности

Для проведения медицинской реабилитация с методикой ежедневного использования технологий VR разрабатывается многофункциональная механотерапевтическая система с симулятором виртуальной реальности, направленная на улучшение манипулятивной функции нижних конечностей пациентов неврологического профиля путем имитации ходьбы по различным типам поверхности. Совершение циклических движений в положении лежа или сидя – один из широко применяемых методов реабилитации больных с детским церебральным параличом, так как он не требует динамического баланса, который необходим для выполнения упражнений при вертикальном положении тела. Подобные тренировки способствуют увеличению мышечной силы и объема движений в суставах конечностей, улучшению кардиоваскулярных показателей.

Структура данной системы [9], [10] включает в себя контроллер, компьютерную систему управления, шлем виртуальной реальности, исполнительную систему, тактильные датчики обратной связи и датчики медицинского контроля (рис. 1).

В состав данного комплекса, оснащенного компьютерной системой управления с симулятором виртуальной реальности, также входят два исполнительных модуля для правой и левой нижних конечностей. Конструктивно данные модули совершенно идентичны (рис. 2) и включают в себя три основных узла: «голень», «голеностоп» (активный шарнир) и «стопа». При помощи гибких манжет исполнительные модули прикрепляются к ногам пациента, обеспечивая достаточно жесткую фиксацию конечностей пользователя относительно подвижных звеньев реабилитационной системы. Конструкция «голе-

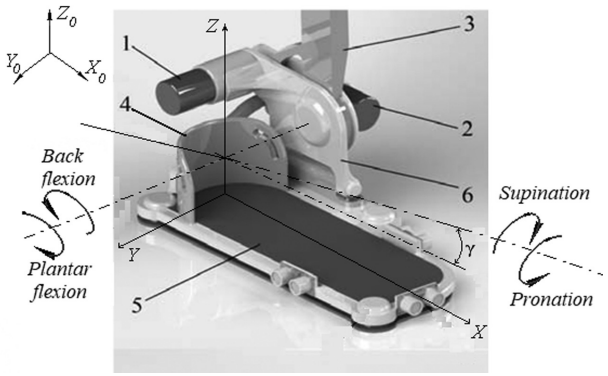


Рис. 2. Исполнительный модуль роботизированной реабилитационной системы (а) и голеностопный узел (б): 1, 2 – приводы активного шарнира; 3 – голень; 4 – задняя опора; 5 – стопа; 6 – корпус; γ – угол подтаранного сустава

ностопа» в соответствии с анатомическими особенностями голеностопного сустава позволяет реализовать для него две степени подвижности. Важную роль в реализации требуемых при ходьбе локомоций, обеспечивающих устойчивую походку, играет конструкция «стопы». Данный узел обеспечивает одновременный поворот стопы относительно голени в двух плоскостях. Величина крутящих моментов, обеспечивающих такое вращение, достигает значительных величин (порядка 60…80 Н·м) [11]. При этом габариты и вес как самих приводов, так и исполнительных звеньев остаются минимальными.

Наличие двух управляемых приводов «голеностопа», позволяет одновременно поворачивать стопу пациента относительно голени сразу вокруг двух осей, точка пересечения которых совпадает с центром вращения голеностопного сустава. Ориентация «стоп» исполнительных модулей роботизированной реабилитационной системы в пространстве осуществляется с помощью подвижной (относительной) $Oxyz$ и неподвижной (абсолютной) $O_0x_0y_0z_0$ систем координат. Причем одна из осей реабилитационного устройства совпадает с осью вращения таранного сустава стопы пациента, что и позволяет обеспечивать ее супинацию и пронацию. За ротацию стопы (тыльное и подошвенное сгибание) отвечает расположенная в поперечной плоскости вторая ось (см. рис. 1). Именно данная конструкция позволяет стопе пациента совершать движения близкие к биологически инспирированным.

В конструкции приводов «стопы» для преобразования движения вала электродвигателя в угловое перемещение исполнительного звена используется зубчато-ременная передача, которая одновременно выступает как гаситель случайных колебаний, возникающих в результате непроизвольных движений конечности пациента. Исполнительные приводы роботизированной реабилитационной системы реализованы на основе двух независимых мехатронных модулей, включающих электродвигатель постоянного тока, понижающий редуктор, преобразующую зубчато-ременную передачу, датчик выходной величины, усилительную схему (драйвер электродвигателя). Исполнительные модули непосредственно соединены с блоком управления движением, и с блоком питания [12], [13].

Общая структурная схема системы управления нейрореабилитационной роботизированной системы представлена на рис. 3. Основой системы управления реабилитационной роботизированной системы является блок управления движением, который осуществляет генерацию задающих воздействий для электроприводов, отслеживание показаний датчиков обратной связи [14].

Выбор и настройка режимов реабилитации с помощью роботизированной системы осуществляется посредством пульта управления. В состав разработанной системы также входит блок управления питанием, обеспечивающий питание 5 и 3,3 В для цифровых устройств и 12 В для питания электроприводов. Питание всей реабилитационной роботизированной системы осуществляется от внешнего источника. Важной функцией блока управления силовым питанием является возможность экстренного отключения во внештатных ситуациях. Дополнительно блок управления позволяет выводить

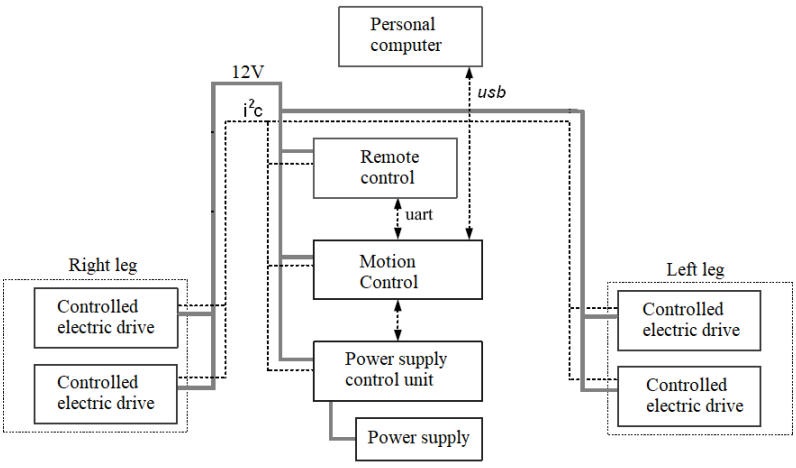


Рис. 3. Общая структурная схема системы управления нейрореабилитационной роботизированной системы

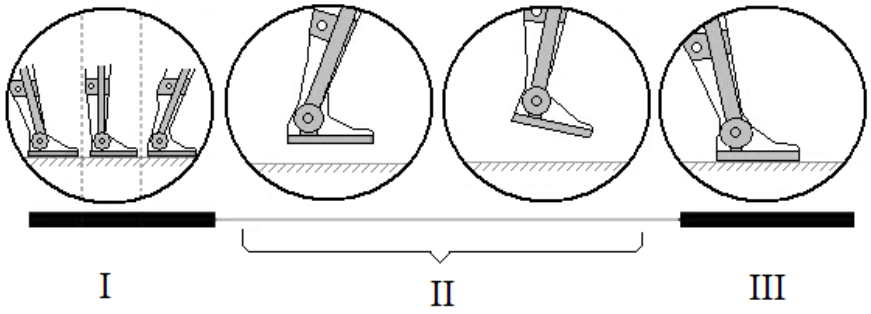


Рис. 4. Этапы реализации требуемых локомоций

на монитор оператора уровни питающего напряжения всех управляемых электроприводов, энергопотребление, положение (углы поворота) исполнительных звеньев и т. п.

Нейрореабилитационная роботизированная система позволяет проводить мотивированную терапию с немедленной обратной связью, что дает возможность проводить оценку прогресса осуществляемой терапии [15]. Импульсные датчики, установленные на выходном валу электродвигателей мехатронных приводов, «выдают» 2000 импульсов на один оборот. Ширина полосы пропускания в модуле, как и скорость отклика, определяются передаточной функцией механической цепи и усилителями мощности [16], [17]. Для разрабатываемой роботизированной системы ширина полосы пропускания механической цепи активного шарнира составляет примерно 16 Гц, ширина полосы пропускания усилителя примерно 1,7 кГц. Вычисление управляющего сигнала происходит через каждые 5 мс (200 Гц). В программном обеспечении используется язык C++.

Комплексная реабилитация пациентов с различными нарушениями двигательных функций нижних конечностей требует разработки не только специального оборудования медицинского и специальных технологий с таргетной направленностью воздействия на конечности для осуществления передвижения и увеличения объема супинации [18]. Нейреабилитационная роботизированная система с симулятором виртуальной реальности обязательно включает в себя шлем виртуальной реальности в сочетании с тактильными датчиками движения, зафиксированными на голени и стопе [19]. Для дополнительной психоэмоциональной мотивации управляющая программа должна генерировать специально разработанную визуальную среду, в которой пациенту необходимо совершать локомоции голеностопного сустава, направленные на супинацию-пронацию при вращении стопы.

Процесс реализации требуемых локомоций для одной конечности при осуществлении одного шага можно разбить на последовательные этапы (рис. 4).

Этап I: нога пациента находится в вытянутом положении, микропроцессор посылает сигнал драйверам для включения двигателей приводов «голеностопа», «стопа» устройства получает сигнал о касании с опорной поверхностью.

Этап II: поворот «стопы» против хода часовой стрелки на требуемые значения угла тыльного сгибания до отрыва стопы от опорной поверхности.

Этап III: «голень» и «стопа» поворачиваются по часовой стрелке совершая подошвенной сгибание до достижения тактильного контакта с «опорной поверхностью». Затем аналогичные движения совершает другая конечность и цикл повторяется.

Необходимо отметить, что перед и после проведения курса медицинской реабилитации каждому пациенту следует провести замеры углов супинации и пронации каждой конечности. Пронация и супинация стопы измеряются во фронтальной плоскости.

С учетом всех аппаратных особенностей разрабатываемой реабилитационной робоизированной системы был разработан алгоритм функционирования управляющей программы (рис. 5, 6).

Разработанный алгоритм управления был реализован в экспериментальных исследованиях. Выполнение локомоций при помощи разрабатываемой нейрореабилитационной роботизированной системы [20] отличается от обычной ходьбы и связано с тем, что для обеспечения устойчивой ходьбы и минимизации нагрузки в голеностопном суставах «стопам» исполнительных модулей необходимо контактировать с «опорной поверхностью» сразу по всей площади. Особенность такой походки заключается в том, что контакт с «опорной поверхностью» происходит сразу всей стопой пациента, а фаза

переноса состоит во вращении «голени» опорной ноги относительно «стопы» исполнительного модуля. Это обстоятельство ограничивает «скорость движения» при помощи реабилитационной роботизированной системы, так как угол поворота узла «голени» ограничен конструктивными возможностями приводов активных шарниров». Фаза опоры на стопу значительно длительнее, чем фазы переноса, поскольку компьютерная система управления роботизированной системы в зависимости от выбранной программы реабилитации отрабатывает алгоритмы «ходьбы» пациента с некоторой задержкой. Выполнение локомоций происходит

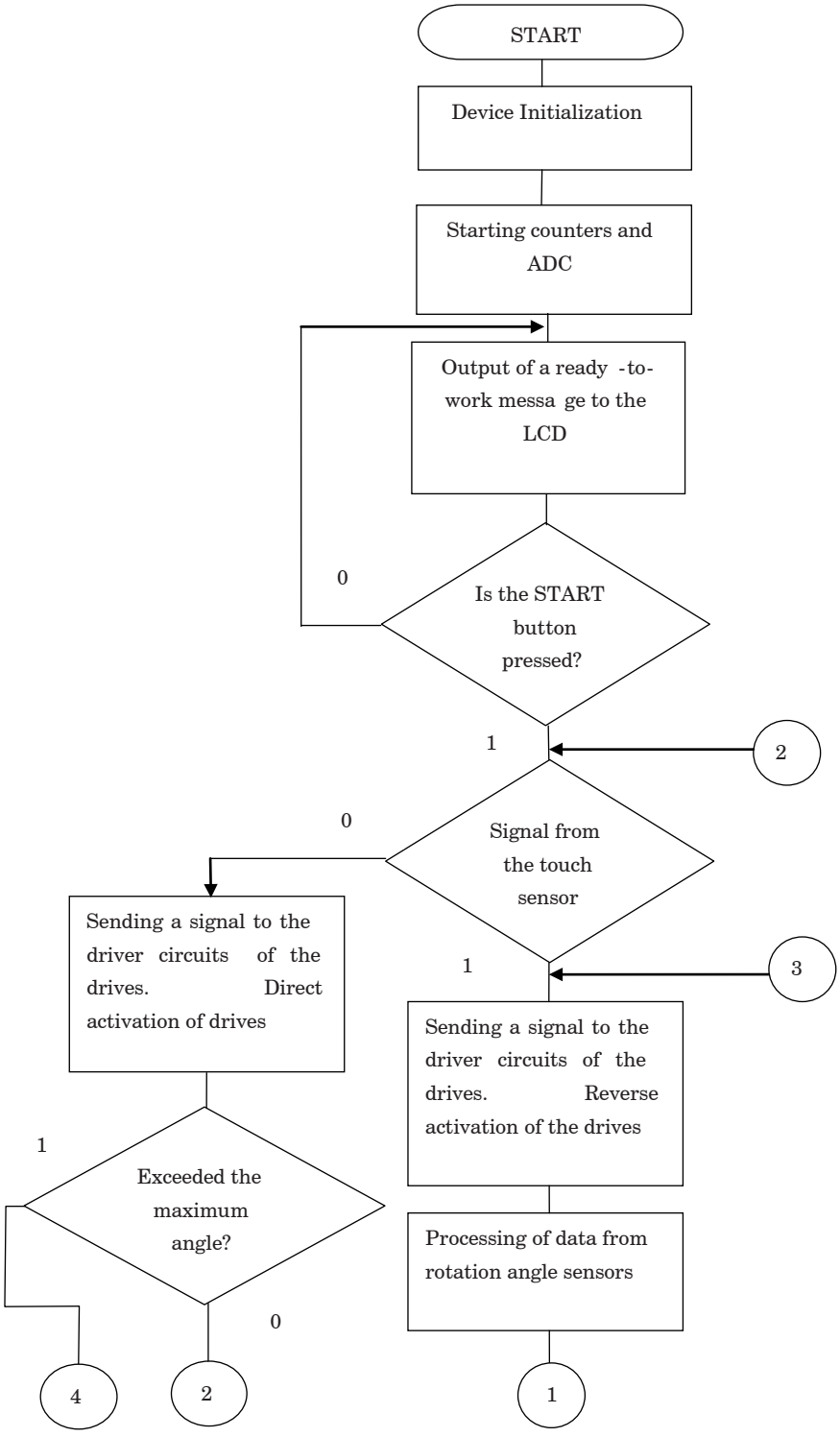


Рис. 5. Алгоритм управляющей программы (часть 1)

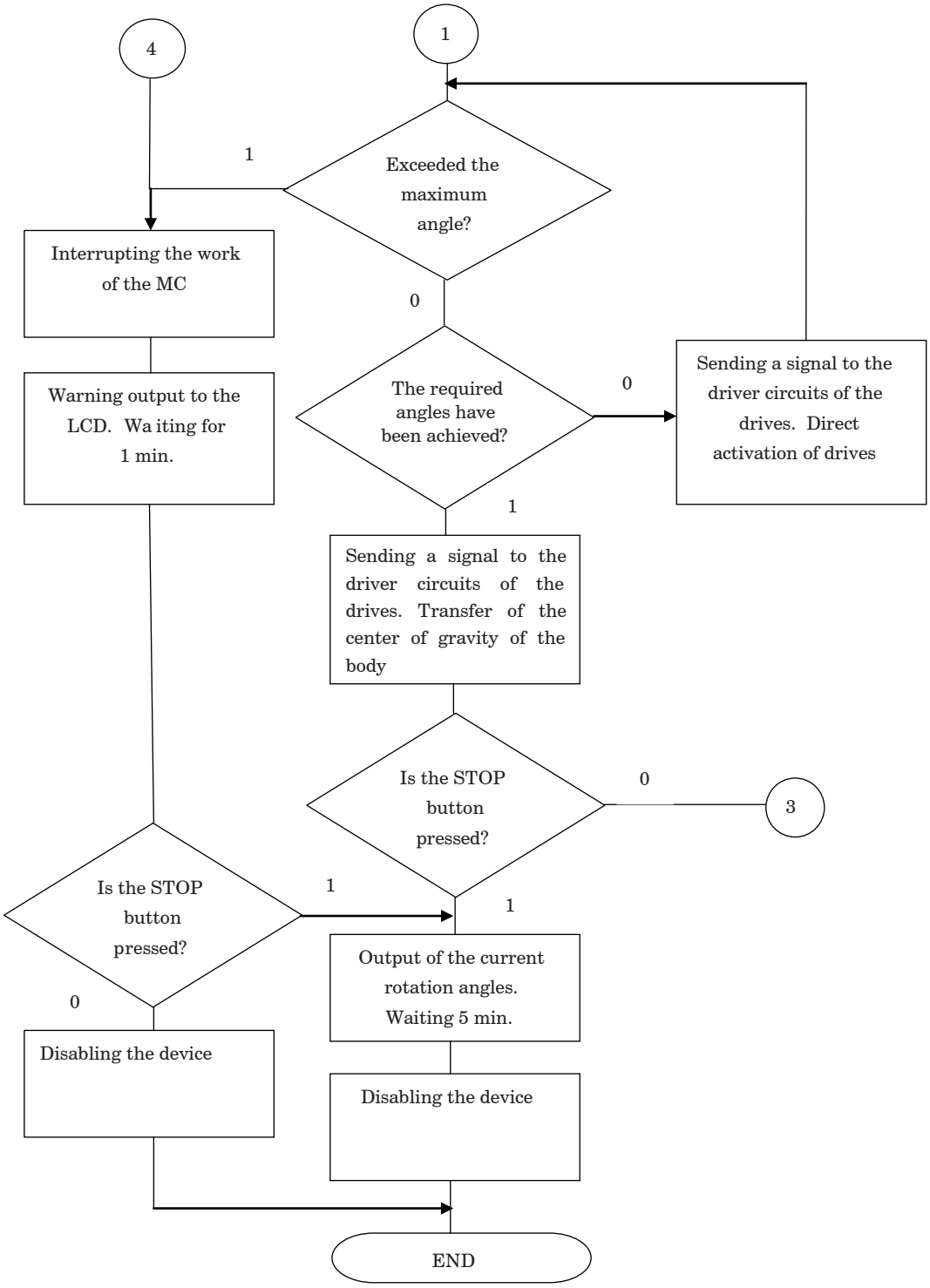


Рис. 6. Алгоритм управляющей программы (часть 2)

достаточно медленно и «походка» близка к квазистатической.

Графики изменения угла между голенью и стопой для левой и правой нижних конечностей в сагиттальной и фронтальной плоскостях представлены на рис. 7. На графиках можно выделить три описанных выше этапа. Моменты изменения состояния контакта стопы с «опорной поверхностью» отмечены вертикальными линиями. Этап I: подготовка к отрыву стопы от поверхности. Этап II: перенос конечности, который заканчивается ее постановкой на «опорную поверхность. Этап III: двухопорная фаза движения и начало фазы переноса для второго шага.

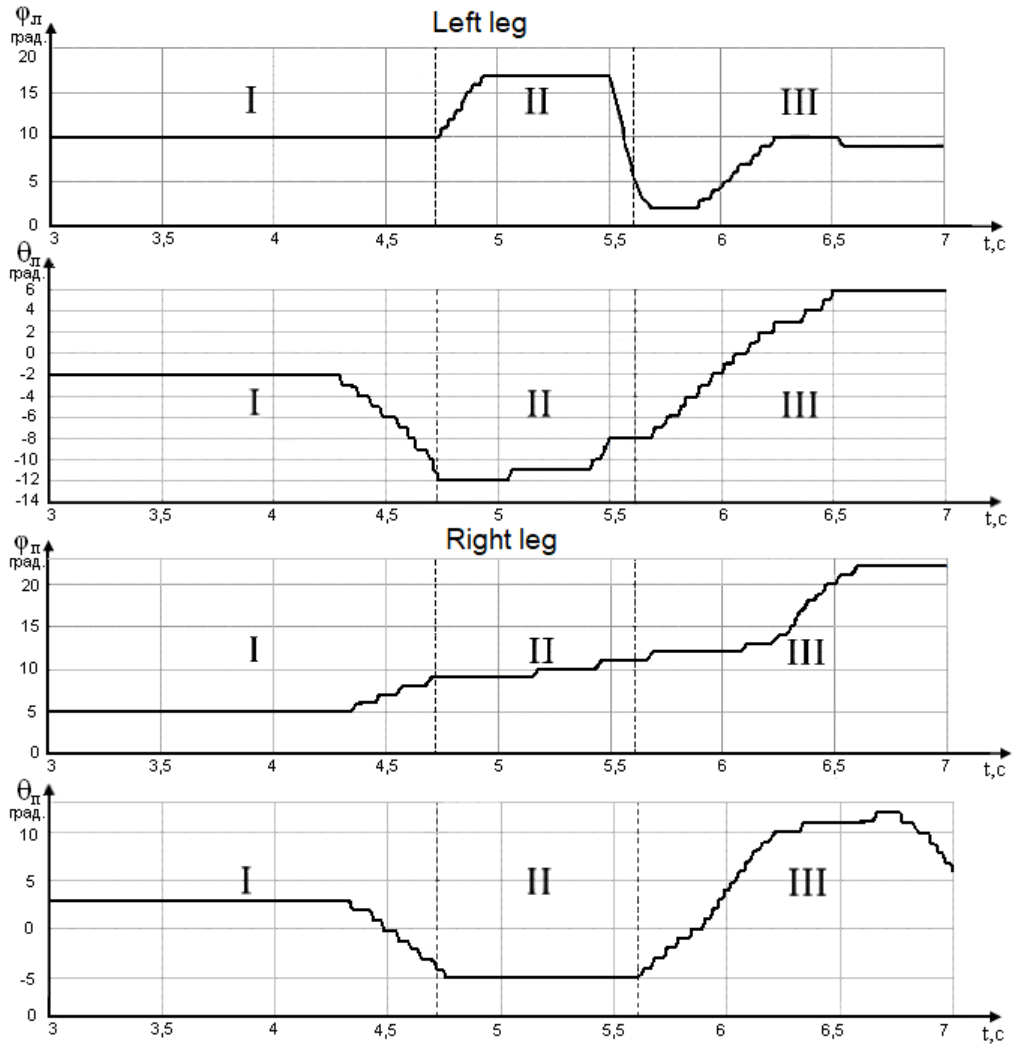


Рис. 7. Исследование движения в узле «голеностоп»

Анализ графика изменения угла $\phi_л$ между «стопой» и «голенью» левой конечности в сагиттальной плоскости позволяет утверждать, что значение данного угла начинает изменяться одновременно с началом фазы переноса для первого шага, время начала изменения совпадает со временем отрыва стопы от «опорной поверхности» Амплитуда пронации-супинации «стопы» роботизированной системы в течение первого шага составляет 11 °, что на 14 ° меньше максимальной амплитуды изменения этого угла в процессе обычной ходьбы. Аналогичный анализ графика изменения данного угла для левой конечности $\theta_л$ во фронтальной плоскости показывает, что локомоции начинаются с полным взаимодействием «стопы» с «опорной поверхностью», после чего происходит ее отрыв от поверхности. В сагиттальной плоскости поворот «голени» относительно «стопы» правой конечности приводит к увеличению угла $\phi_п$ до 8 °, что примерно соответствует движению реального биологического объекта (8–10 °).

Сегодня одним из наиболее перспективных направлений нейрореабилитации становится применение роботизированных механотерапевтических систем с симулятором виртуальной реальности. Такие системы позволяют, не выходя из стен лечебного учреждения, сгенерировать на экране реабилитационного комплекса практически любую окружающую среду, имитирующую реальное пространство. Осуществляя тактильное взаимодействие с такой средой и участвуя в виртуальных событиях, у пациентов появляются новые возможности для осуществления локомоторных функций и перемещения в пространстве. В условиях виртуальной реальности в случае ошибки пациент (при условии сохранения интеллектуальных

способностей) может самостоятельно корректировать паттерн необходимых движений. Комплексная реабилитация на основе VR-технологий позволяет сочетать высокую мотивацию для достижения требуемого эффекта при моделировании любого пространство и обеспечивая биологическую обратную связь.

Особенности конструкции разрабатываемой роботизированной системы с симулятором виртуальной реальности дают возможность восстанавливать утраченные в результате травм или неврологических заболеваний двигательные функции нижних конечностей посредством упражнений, симулирующих повседневную активность, улучшая функции и предотвращая неблагоприятные эффекты от вынужденной длительной обездвиженности конечности. При этом должен быть предусмотрен широкий выбор эффективных упражнений с различными уровнями сложности для соответствия способностям каждого пациента. Специальные упражнения помогают пациентам значительно расширить доступный объем движений. Разработанное программное обеспечение регистрирует движения нижних конечностей, позволяя врачу оценить координационные способности пациента и прогресс терапии.

Таким образом, в ходе разработки управляющего алгоритма функционирования нейрореабилитационной роботизированной системы с симулятором виртуальной реальности, обеспечивающей принудительную разработку нижних конечностей человека были проведены исследования движений в голеностопном суставе нижних конечностей, которые позволили наглядно оценить угловые перемещения подвижных звеньев исполнительного модуля, являющиеся максимально приближенными к биологически инспирированным локомоциям. Данное условие оказывает положительное влияние на состояние пациента. Разработанный алгоритм, а также изучение возможных способов управления создаваемой биомехатронной системы позволяет реализовать наиболее функциональные режимы ее работы, обеспечивая подбор оптимальной методики реабилитации.

Исследование выполнено в рамках реализации Федеральной программы трансформации вузов «Приоритет-2030».

Список источников

1. *Volovik M., Borzikov V., Kuznetsov A.* Virtual reality technology in complex medical rehabilitation of patients with disabilities (review). Modern Technologies in Medicine, 2018. Vol. 10. N 4. P. 173–182.

2. *Кривчук М. А.* Принцип работы устройств виртуальной реальности // Обществознание и социальная психология, 2022. № 10 (40). С. 82–85.

3. *Jatsun S., Jatsun A., Rukavitsyn A.* Creation of a biomechatronic orthopedic device for the treatment of flat feet. Biomedical Engineering, 2021. Vol. 54. N 5. P. 361–365.

4. *Яцун С. М., Яцун А. С., Рукавицын А. Н.* Новые подходы к реабилитации голеностопного сустава с помощью механотерапевтического устройства // Медицинская техника. 2018. № 1. С. 27–30.

5. *Яцун С. М., Яцун А. С., Рукавицын А. Н.* Анализ гемодинамических показателей человека при использования робототехнического комплекса для активной кинезиотерапии // Медицинская техника. 2019. № 4 (316). С. 42–45.

6. *Аглямов Ф. Р., Кугураков В. С.* Тренажер для реабилитации пациентов с проблемами мобильности руки, построенный с использованием технологий виртуальной реальности // Программные продукты и системы. 2022. № 3. С. 285–292.

7. *Зуев А. С., Исаев Р. А.* Нейроинтерфейсы – новый инструментарий человеко-компьютерного взаимодействия // Наукоемкие технологии. 2022. Т. 23. № 2. С. 70–82.

8. *Юсупов Ф. А., Юлдашев А. А.* Нейропластичность и возможности современной нейрореаблитации // Бюллетень науки и практики. 2022. Т. 8. № 3. С. 251–273.

9. *Зинченко Ю. П., Меньшикова Г. Я., Баяковский Ю. М.* Технологии виртуальной реальности: методологические аспекты, достижения и перспективы // Национальный психологический журнал. 2010. № 1. С. 54–62.

10. *Тычков А. Ю., Волкова К. Ю., Киселева Д. В.* Обзор систем виртуальной реальности // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2020. № 2 (54). С. 3–13.

11. *Яцун С. М., Яцун А. С., Рукавицын А. Н.* Создание биомехатронного ортопедического устройства для лечения плоскостопия // Медицинская техника. 2020. № 5 (323). С. 47–50.

12. *Иващенко А. В., Орлов С. П., Кривошеев А. В.* Пользовательские интерфейсы акцентной визуализации в среде дополненной реальности // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2020. Т. 5. С. 91–95.

13. *Воронков Г. С., Закоян А. Г., Иванов В. В.* Полностью интегральная оптическая сенсорная система с интеррогацией по интенсивности // Информационно-управляющие системы. 2022. № 6. С. 20–30.

14. *Мальцев А. В., Омельченко Д. В.* Технология информационного взаимодействия VR-оборудования с программными компонентами системы виртуаль-

ного окружения. Информационные технологии и вычислительные системы. 2021. № 3. С. 5–14.

15. *Алайцев И. К., Данилова Т. В., Мантуров А. О.* Устройство для симуляции полостных оперативных вмешательств с тактильной обратной связью // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 6. С. 167–169.

16. *Gryzunov V.* Model of a distributed information system solving tasks with the required probability. Informatsionnoupravliaiushchie sistemy // Information and Control Systems. 2022. N 1. P. 19–29.

17. *Stepanov D., Itsykson V.* Backend Bug Finder – a platform for effective compiler fuzzing. Informatsionnoupravliaiushchie sistemy // Information and Control Systems. 2022. N 6. P. 31–40.

18. *Браницкий А. А., Шарма Я. Д., Котенко И. В.* Определение психического состояния пользователей социальной сети Reddit на основе методов машинного обучения // Информационно-управляющие системы. 2022. № 1. С. 8–18.

19. *Журба Я. С., Фильченков А. А., Азаров А. А.* Алгоритмы непрерывного управления для маршрутизации конвейера на основе мультиагентного глубокого обучения с подкреплением // Информационно-управляющие системы. 2022. № 6. С. 10–19.

20. *Кравцова Н. Е., Преображенский А. П.* О проблемах использования виртуальной реальности // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2018. № 4 (27). С. 67–69.

ЭЛЕКТРОПРИВОД, ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

УДК 681.586.326 **DOI: 10.31799/978-5-8088--1823-1-2023-18-164-169**

А. С. Бодылев*
аспирант
А. Н. Яшин*
аспирант
А. А. Конев*
аспирант
М. И. Хакимьянов*
доктор технических наук, доцент
**Уфимский государственный нефтяной технический университет*

О МЕТОДАХ КОНТРОЛЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СКВАЖИННЫХ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ НАСОСОВ

Рассмотрены скважины с погружными электроцентробежными насосами, винтовыми насосами и штанговыми глубинными насосами; основные методы контроля за нефтедобывающими скважинами – измерение динамограмм и ваттметрограмм. Предложено проведение диагностики состояния погружного и наземного оборудования при помощи измерения мгновенных значений активной мощности.
Ключевые слова: *нефтяная скважина, штанговый глубинный насос, электродвигатель, ваттметрограмма, частотный спектр.*

A. S. Bodylev*
PhD Student
A. N. Yashin*
PhD Student
A. A. Konev*
PhD Student
M. I. Khakimyanov*
Dr. Sc. Tech., Associate Professor
**Ufa State Petroleum Technological University*

ABOUT OPERATING MODES CONTROL METHODS OF DOWNHOLE OIL-PRODUCING PUMPS ELECTRIC DRIVES

Wells with submersible electric centrifugal pumps, screw pumps and sucker rod pumps are considered; the main methods for monitoring oil wells are the measurement of dynamometers and wattmeters. It is proposed to carry out diagnostics of the state of submersible and surface equipment by measuring instantaneous values of active power.
Keywords: *oil well, sucker rod pump, electric motor, wattmeter card, frequency spectrum.*

Введение

Скважинная добыча нефти является достаточно сложным и дорогостоящим технологическим процессом. Скважинные насосы находятся в скважинах на значительных глубинах (до 3000 м и более), что затрудняет контроль параметров добычи и состояния нефтедобывающего оборудования [1]. Однако он необходим для осуществления рационального природопользования, а также минимизации затрат нефтедобывающих предприятий на покупку электроэнергии и ремонт оборудования [2].

Основными способами добычи углеводородного сырья в нашей стране являются использования погружных электроцентробежных, штанговых глубинных и винтовых насосов (ЭЦН, ШГН и ВН) [3], [4]. Используемые винтовые насосы могут иметь привод как от погружного электродвигателя, так и от установленного на поверхности, энергия от которого передается при помощи вращения колонны штанг. Таким

образом, энергия может передаваться скважинному насосу как в виде электричества, так и в виде механического возвратно-поступательного либо вращательного движения колонны штанг [5], [6].

Обзор применяемых методов контроля за режимами работы электроприводов скважинных насосов

В настоящее время на нефтедобывающих промыслах нашей страны используются различные методы контроля для ЭЦН, ВН и ШГН [7].

Для ЭЦН (рис. 1) используется контроль электрических параметров в станции управления – ток, напряжение, активная, реактивная и полная мощности, коэффициент мощности, сопротивление изоляции [8]. Также на устье скважины устанавливаются датчики давления, температуры. Иногда скважины оснащают блоками погружной телеметрии, которые измеряют параметры на забое скважины – давление, температуру, расход жидкости, уровни вибрации по трем осям, температуру обмоток электродвигателя, напряжение на его клеммах.

Информация с блока погружной телеметрии передается на поверхность путем наложения высокочастотных импульсов между двумя фазами питающего напряжения. Такой канал связи подвержен воздействию электромагнитных помех, является достаточно медленным и ограниченным по количеству передаваемой информации. Так, период обновления информации обычно составляет несколько десятков секунд, а разрешающая способность передаваемых параметров не превышает шести бит [9].

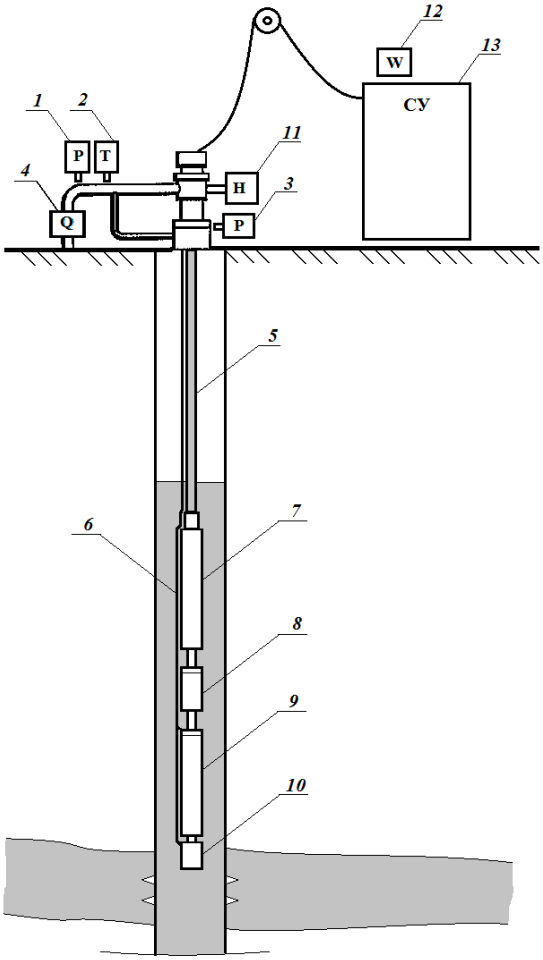


Рис. 1. Скважинная установка ЭЦН с технологическими датчиками: 1 – датчик контроля давления на устье; 2 – датчик контроля температуры на устье; 3 – датчик затрубного давления; 4 – датчик расхода жидкости; 5 – колонна насосно-компрессорных труб; 6 – электрический кабель; 7 – погружной центробежный насос; 8 – протектор; 9 – погружной электродвигатель; 10 – блок погружной телеметрии; 11 – датчик уровня жидкости; 12 – блок измерения ваттметрограмм; 13 – станция управления

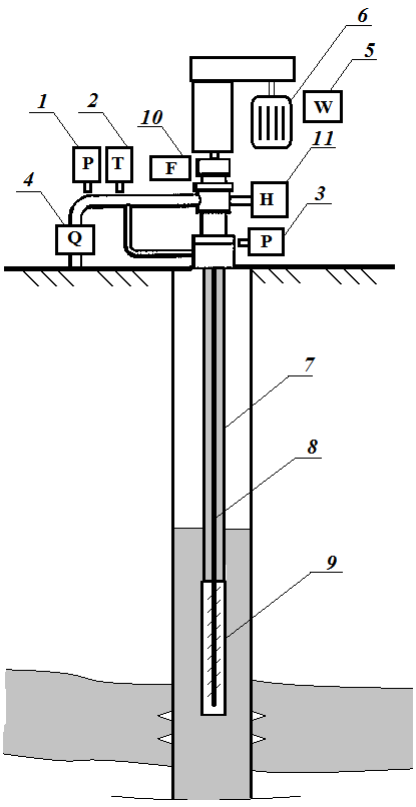


Рис. 2. Скважинная установка ВН с технологическими датчиками: 1 – датчик контроля давления на устье; 2 – датчик температуры на устье; 3 – датчик давления в затрубном пространстве; 4 – датчик расхода жидкости; 5 – блок измерения ваттметрограмм; 6 – электродвигатель; 7 – колонна насосно-компрессорных труб; 8 – колонна штанг; 9 – ВН; 10 – датчик контроля веса колонны; 11 – датчик уровня жидкости

Скважины, оснащенные винтовыми насосами с поверхностным приводом (электродвигатель установлен на устье скважины), также могут оснащаться датчиками, как это показано на рис. 2. Кроме вышеперечисленных параметров здесь может быть установлен датчик, измеряющий вес штанговой колонны [10].

Схема оснащения датчиками скважины с ШГН показана на рис. 3 [11]–[13]. Основным методом контроля за состоянием погружного оборудования является измерение динамограмм с помощью датчиков усилия 5 и положения 6. За состоянием поверхностного оборудования следят с помощью информации, получаемой с блока измерения ваттметрограмм 7. Следует отметить, что наличие на станке-качалке датчиков динамометрирования хоть и позволяет получать много нужной информации, но доставляет нефтяникам много дополнительных хлопот: датчики требуется обслуживать, ремонтировать, снимать на поверку. Динамометрирование позволяет определять основные неисправности в насосе: утечки в приемном и нагнетательном клапанах, влияние пластового газа, срыв подачи, низкую и высокую посадки плунжера, запарафинивание насоса, искривление и прихват плунжера, выход плунжера из насоса и другие [14]–[15].

Однако несмотря на большое количество определяемых неисправностей, так и не были созданы надежные и практичные датчики для систем динамометрирования, которые бы не доставляли неприятностей обслуживающему персоналу. Поэтому в настоящее время существует потребность в системах, позволяющих контролировать работу скважинных насосов без использования датчиков динамометрирования.

Метод контроля состояния нефтедобывающего оборудования по измеренным ваттметрограммам

Диагностикой состояния нефтедобывающего оборудования и управлением по результатам ваттметрирования занималось несколько ученых. Известны работы Кричке В. О., Гольдштейна Е. И., Садова В. Б., Зюзева А. М., Рзаева А. и др. [16]–[20].

Здесь можно выделить несколько подходов. Ряд исследователей (Кричке В. О., Гольдштейн Е. И.) предлагали прямо получать информацию из ваттметрограммы [21]. Во второй половине XX века было предложено несколько устройств на основе аналоговой электроники, позволяющих корректировать режимы эксплуатации скважин.

Второй подход заключается в построении при помощи математического аппарата расчетной динамограммы из измеренной ваттметрограммы (Садов В. Б., Рзаев А.). Далее полученная расчетным путем динамограмма подвергается анализу с использованием цифровой вычислительной техники.

По мнению авторов, наиболее эффективным будет использование комбинации этих подходов. Непосредственно из ваттметрограммы могут быть определены дефекты в наземном оборудовании (в редукторе, подшипниках станка-

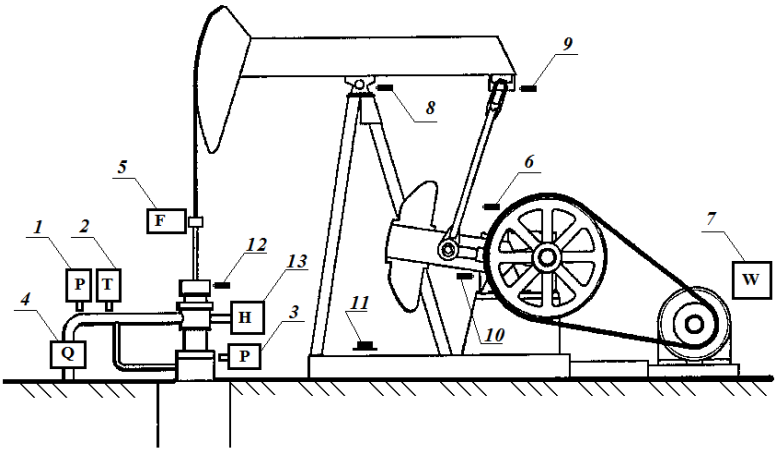


Рис. 3. Скважинная установка ШГН с технологическими датчиками: 1 – датчик контроля давления на устье; 2 – датчик контроля температуры на устье; 3 – датчик контроля затрубного давления; 4 – датчик измерения расхода; 5 – датчик усилия для динамометрирования; 6 – датчик положения для динамометрирования; 7 – блок измерения ваттметрограммы; 8 – индикатор состояния подшипника балансира; 9 – индикатор срыва шатуна; 10 – датчик контроля уровня масла в редукторе; 11 – датчик крена установки; 12 – датчик перегрева сальникового узла; 13 – датчик уровня жидкости

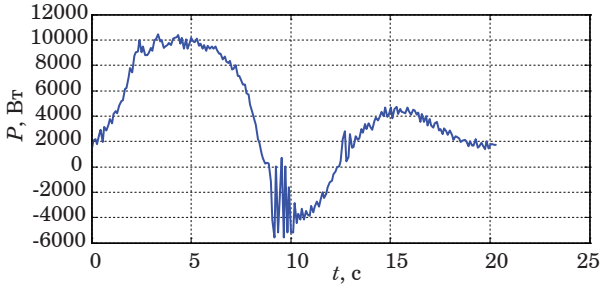


Рис. 4. График ваттметрограммы скважины

качалки), оценена степень сбалансированности противовесов установки. Далее по полученной расчетным путем динамограмме могут быть определены дефекты погружного оборудования [22].

В последнее время получает развитие подход по диагностированию состояния электродвигателя и подключенного механизма по анализу спектра ваттметрограммы. На рис. 4 приведен график ваттметрограммы, а на рис. 5 – частотный спектр.

При обработке графика ваттметрограммы определяют среднее значение потребляемой мощности за период

$$P_{\text{ср}} = \frac{\sum P_i}{n},$$

где P_i – мгновенное значение активной мощности в каждый момент времени, Вт; n – количество точек активной мощности за цикл качания.

Далее определяется дисперсия по выражению

$$S^2 = \frac{\sum (P_i - P_{\text{сгл_i}})^2}{n},$$

где $P_{\text{сгл_}i}$ – точка сглаженного массива активной мощности, Вт.

Из графика ваттметрограммы находят вибрационную и ударную составляющие. Из дисперсии определяют среднеквадратичное отклонение, которое и является вибрационной составляющей. Ударная составляющая равна максимальному отклонению измеренной ваттметрограммы от сглаженной.

По построенному частотному спектру ваттметрограммы можно определить дефекты зубчатой передачи редуктора, подшипников, элементов станка-качалки, а также недостаточный уровень масла в редукторе.

Анализируя высокочастотные составляющие спектра могут быть найдены дефекты электродвигателя (износ подшипников, дисбаланс, обрыв фаз и другие).

Заключение

На основе приведенного материала могут быть сделаны следующие выводы.

1. Для обеспечения интеллектуального управления режимами эксплуатации скважин необходимо непрерывно получать информацию о ряде технологических параметров. Для скважин, экс-

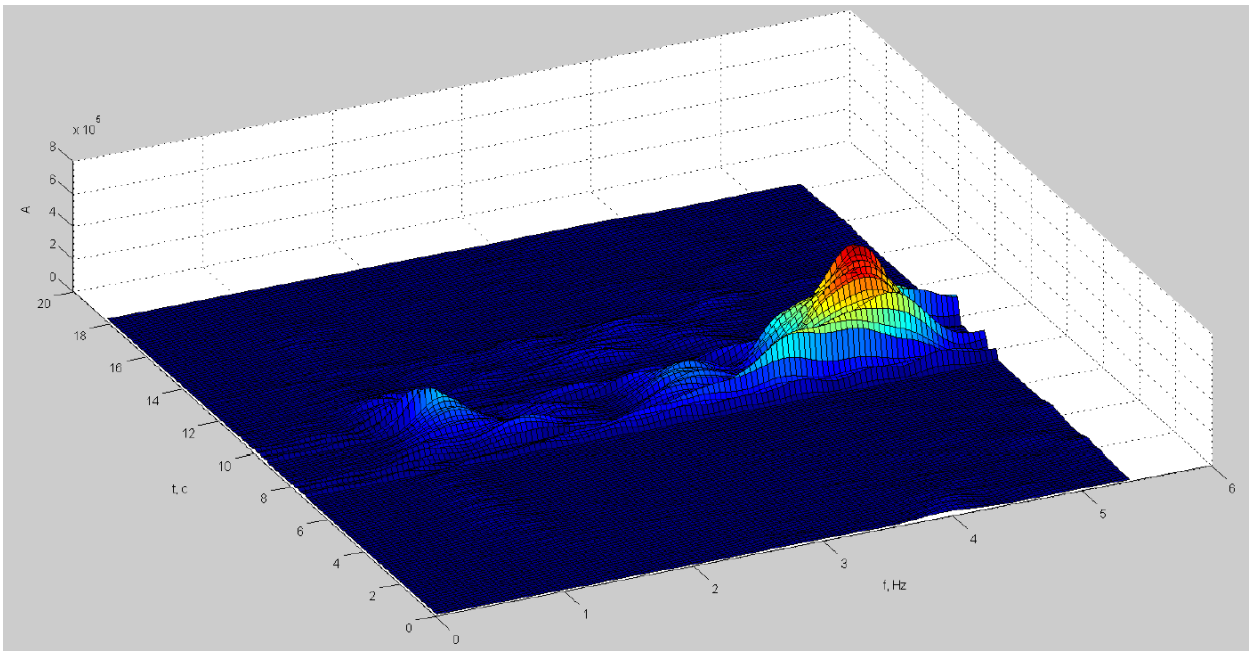


Рис. 5. Трехмерный спектр ваттметрограммы

плуатируемых ШГН, такими параметрами являются динамограмма и ваттметрограмма.

2. Оснащение установки ШГН датчиками динамометрирования значительно усложняет работу эксплуатирующего персонала, так как датчики часто выходят из строя, обрываются их кабели, требуется проведение их технического обслуживания и поверки. Поэтому в настоящее время возник запрос нефтяников на разработку бездатчиковых алгоритмов и систем управления.

3. Динамограмма работы ШГН может быть получена математически из измеренной ваттметрограммы. При этом по исходной ваттметрограмме определяются дефекты в наземной части оборудования – в зубчатой передаче редуктора, подшипниках, элементах станка-качалки. По вычисленной динамограмме определяются дефекты погружного насоса – утечки в клапанах, слишком низкая и высокая посадки плунжера, искривление цилиндра, влияние пластового газа, срыв подачи и другие.

4. Анализируя высокочастотную часть спектра можно выявить дефекты электродвигателя. Поэтому диагностика состояния электродвигателей вместе с рабочими механизмами на основе анализа частотных спектров тока, напряжения и мощности сейчас активно развивается.

Список источников

1. *Деев В. Г., Смородов Е. А., Исмаков Р. А.* Методы экспресс-оценки качества фонда нефтедобывающих скважин // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2001. № 1. С. 40–45.

2. *Абрамович Б. Н., Сычев Ю. А.* Проблемы обеспечения энергетической безопасности предприятий минерально-сырьевого комплекса // Записки горного института. 2016. Т. 217. С. 132–139.

3. *Хакимьянов М. И., Шафиков И. Н.* Анализ потребления электроэнергии при механизированной добыче нефти электроцентробежными насосами // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9. № 3. С. 37–41.

4. *Глебова Л. В., Галиахметов И. Ф.* Техника и технологии добычи углеводородного сырья на Таманском полуострове компанией ООО» РН-Краснодарнефтегаз» // Геология, география и глобальная энергия. 2017. № 4. С. 39–43.

5. *Уразаков К. Р., Валеев А. М., Абуталипов У. М.* Применение винтовых насосов с поверхностным приводом для добычи нефти // Нефтяное хозяйство. 2003. № 6. С. 108–110.

6. *Сидоркин Д. И., Миннивалеев Т. Н.* Пути совершенствования скважинных винтовых насосных установок со штанговым приводом // Современные технологии в нефтегазовом деле-2016. Уфа, 2016. С. 85–87.

7. *Шагиев В. Р., Хакимьянов М. И.* Системы измерения технологических параметров механизированных нефтедобывающих скважин // Вестник молодого ученого УГНТУ. 2015. № 2. С. 5–9.

8. *Сушков В. В., Тимошкин В. В., Сухачев И. С.* Оценка остаточного ресурса изоляции погружного электродвигателя установок электрических центробежных насосов добычи нефти при воздействиях импульсных перенапряжений // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 10. С. 74–80.

9. *Феофилактов С. В.* Высокоточные системы погружной телеметрии для проведения гидродинамических исследований // Нефтегазовая вертикаль. 2011. № 11. С. 62–63.

10. *Шакиров А. А.* Беспроводные системы телеметрии для прямого мониторинга работы пластов-будущее нефтепромысловой геофизики // Каротажник. 2016. № 7. С. 171–179.

11. *Штыков К. В., Ронжин А. А., Денисова Н. В.* Обоснование выбора датчиков установок штангового глубинного насоса для измерения технологических параметров // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии. 2019. С. 426–431.

12. *Миловзоров Г. В., Хакимьянов М. И., Редькина Т. А.* Системы управления для интеллектуальных скважин, эксплуатируемых глубинно-насосным способом // Интеллектуальные системы в производстве. 2015. № 1. С. 55–58.

13. *Курмашов А. А., Гарифуллин Р. С., Ахметзянов Л. М.* Повышение эффективности эксплуатации скважин, оснащенных штанговыми скважинными насосными установками // Нефтепромысловое дело. 2016. № 8. С. 45–52.

14. *Бубнов М. В., Зюзев А. М.* Средства диагностирования оборудования установок штанговых глубинных насосов // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. Екатеринбург, 2016. Уральский федеральный университет, 2016. С. 175–178.

15. *Тимофеев А. О., Ясовеев В. Х.* Автономный датчик усилия системы динамометрирования штанговой скважинной глубиннонасосной установки // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2015. Т. 19. № 4 (70). С. 34–39.

16. *Кричке В. О.* Автоматический анализатор работы глубиннонасосной установки // Автоматизация и телемеханика в нефтяной промышленности. 1975. №12. С. 10–14.

17. *Исаченко И. Н., Гольдштейн Е. И., Налимов Г. П.* Методы контроля сбалансированности станка-качалки на основе измерения электрических параметров // Нефтяное хозяйство. 2002. №1. С. 60–61.

18. *Садов В. Б.* Определение дефектов оборудования нефтяной скважины по динамограмме // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2013. Т. 13. № 1. С. 61–71.

19. *Зюзев А. М., Бубнов М. В.* Диагностика уравновешенности штанговой глубинной насосной установки по ваттметрограмме // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 4. С. 178–187.

20. *Guluyev G., Pashayev A., Pashayev F.* Building the dynamometer card of sucker rod pump using power consumption of the eclectic motor of pumping unit // 2012 IV International Conference "Problems of Cybernetics and Informatics"(PCI). IEEE, 2012. С. 1–3.

21. *Кричке В. О.* Анализ работы станков-качалок с помощью автоматических устройств // Автоматизация и телемеханика в нефтяной промышленности. 1976. № 5. С. 23–25.

22. *Садов В. Б.* Оценка дефектов погружного оборудования нефтяной скважины по динамограмме // Образование и наука в современных условиях. 2015. № 2. С. 204–205.

УДК 621.311 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-170-173**

М. Д. Иванов*
магистрант, инженер
Б. А. Соловьев*
магистрант, инженер
Р. Т. Хазиева*
кандидат технических наук, доцент
**Уфимский государственный нефтяной технический университет*

РАЗРАБОТКА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Рассматривается эффект использования многофункционального интегрированного электромагнитного компонента в предлагаемом схемотехническом решении, реализуемом в фильтрокомпенсирующем устройстве и направленным на усовершенствование данного устройства. Это позволит снизить как финансовые затраты на производство, так и увеличит показатели надежности и позволить добиться лучших массогабаритных показателей.
Ключевые слова: *многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент, фильтрокомпенсирующее устройство, статический синхронный компенсатор, динамические компенсаторы искажений напряжения.*

M. D. Ivanov*
Postgraduate Student, Engineer
B. A. Solovev*
Postgraduate Student, Engineer
R. T. Khazieva*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**Ufa State Petroleum Technological University*

DEVELOPMENT OF A CIRCUIT SOLUTION FOR USE FILTER COMPENSATING DEVICE

The article considers the effect of using a multifunctional integrated electromagnetic component in the proposed circuit solution implemented in a filter compensating device and aimed at improving this device. This will make it possible to reduce both the financial costs of production and increase reliability indicators and allow achieving better weight and size indicators.
Keywords: *multifunctional integrated electromagnetic component, filter compensating device, static synchronous compensator, dynamic voltage distortion compensators.*

Внедрение в электрические сети ветроэнергетических установок, фотоэлектрических станций и микрогазотурбинных установок сопровождается ростом нелинейной нагрузки, что негативно влияет на качество электрической энергии и электромагнитную совместимость [1]. Высшие гармоники тока генерируются электротехнологическим оборудованием: установками электродуговой и контактной сварки, газоразрядными лампами, вентильные преобразователи различных типов и т. д. Актуальной задачей является разработка и проектирование устройств, предназначенных для стабилизации тока и напряжения, компенсации реактивной мощности, снижения уровня высших гармоник и несинусоидальности.

Разработано схемотехническое решение устройства повышения качества электроэнергии с использованием многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (МИЭК), применение которого позволяет повысить уровень интеграции емкостных и индуктивных элементов, а, следовательно, повысить надежность устройства и снизить его массогабаритные показатели [2]. Простейший односекционный МИЭК состоит из двух токопроводящих электродов, скрученных в спираль и разделенных слоем диэлектрика. Каждый электрод МИЭК имеет выводы в начале и в конце (рис. 1).

Каждый проводящий электрод МИЭК имеет собственную индуктивность (L_1, L_2) и сопро-

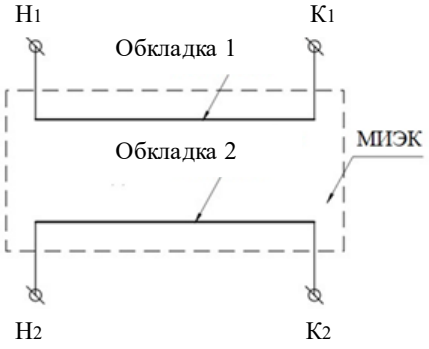


Рис. 1. Схема односекционного многофункционального интегрированного электромагнитного компонента

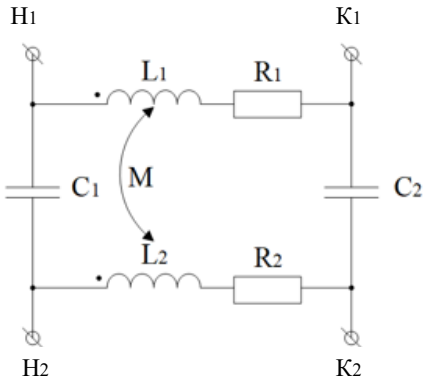


Рис. 2. Электрическая схема замещения односекционного многофункционального интегрированного электромагнитного компонента

тивление (R_1, R_2), а диэлектрический слой между электродами имеет некоторую емкость (C_1, C_2). Существует также взаимная индукция между электродами (М). Таким образом, схема замещения МИЭК будет выглядеть так, как показано на рис. 2.

Интеграция емкостных и индуктивных элементов в едином компоненте позволяет повысить надежность устройства, собранного на основе МИЭК, и снизить его массогабаритные показатели. В зависимости от способа включения выводов МИЭК в электрическую схему, данный компонент может выполнять следующие функции:

1) трансформатор с коэффициентом трансформации, равным 1, для создания гальванической развязки в сетях передачи электроэнергии (при соединении источника напряжения к выводам 1 и 3, а приемника – к выводам 2 и 4);

2) индуктивно-емкостный преобразователь для систем стабилизации тока (при соединении источника напряжения к выводам 1 и 4, а потребителя – к выводам 2 и 3);

3) LC-фильтр для снижения уровня несинусоидальности напряжения и высших гармоник тока (при соединении источника напряжения к выводам 1 и 4, а потребителя – к выводам 3 и 4).

LC-фильтры являются неотъемлемой составляющей устройств повышения качества электроэнергии на основе активных преобразователей и фильтрокомпенсирующих устройств.

Статические компенсаторы реактивной мощности характеризуются быстродействующим регулированием, возможностью подавления колебаний напряжения и симметрированию нагрузок. На рис. 3 приведена структура СТАТКОМ.

На выходе инвертора, который выполняет функцию преобразователя напряжения (ПН) включается широкополосный пассивный фильтр ($C_ф$, $L_ф$, $R_ф$), который настраивается на компенсацию высших гармоник тока. Данный компенсатор можно усовершенствовать, собрав пассивный фильтр с помощью трехфазного индуктивно-емкостного преобразователя (ИЕП) на

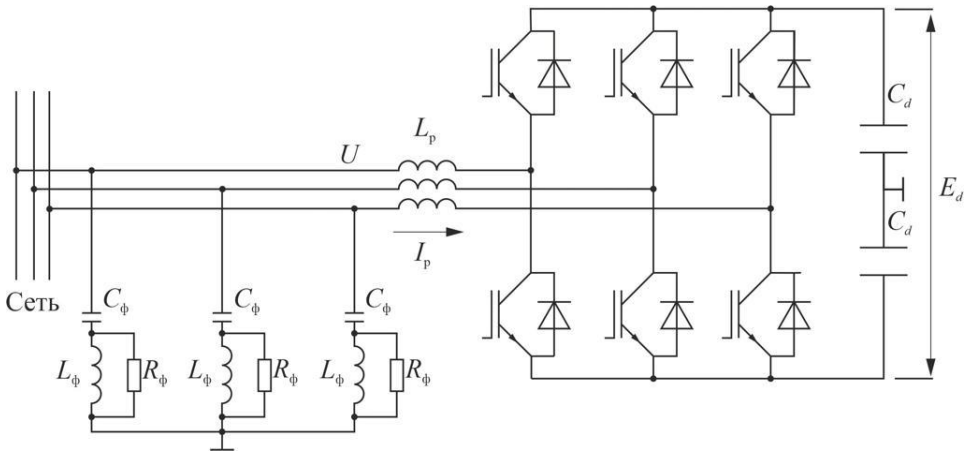


Рис. 3. Структура статического компенсатора реактивной мощности

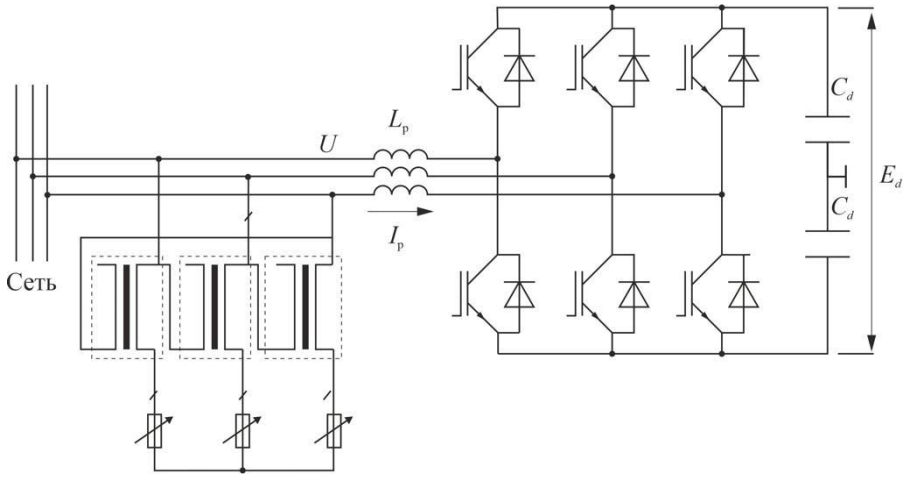


Рис. 4. Способ включения ИЕП на основе МИЭК в состав СТАТКОМ

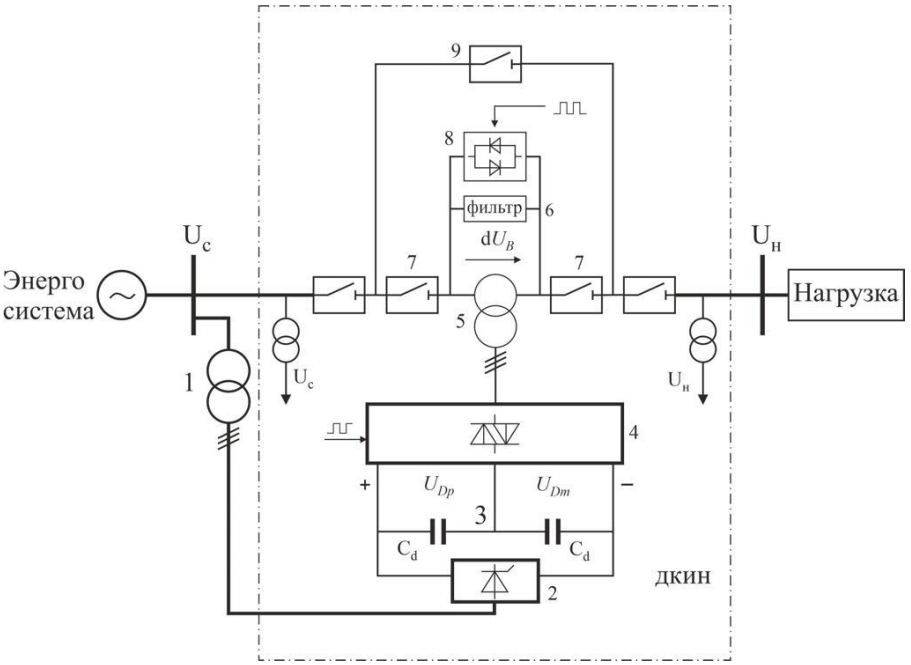


Рис. 5. Структура динамического компенсатора искажения напряжения: Uc – напряжение энергосистемы; Uн – напряжение на нагрузке; UDp – положительное напряжение постоянного тока; UDm – отрицательное напряжение постоянного тока; dUB – напряжение компенсации провала; 1 – входной трансформатор; 2 – тиристорный управляемый выпрямитель; 3 – аккумулирующие конденсаторы; 4 – управляемый инвертор на базе ПУВ; 5 – вольтодобавочный трансформатор; 6 – фильтр высших гармонических составляющих напряжения; 7 – выключатели; 8 – защитное устройство ДКИН; 9 – байпасный выключатель

основе односекционных МИЭК [3], [4]. Применение МИЭК позволит снизить себестоимость изготовления, массу и габариты преобразователя.

На рис. 4 представлен способ подключения ИЕП на основе МИЭК в схему СТАТКОМ.

Динамические компенсаторы искажений напряжения предназначены для устранения перенапряжений и провалов напряжения. На рис. 5 приведена структура ДКИН. Работа данного преобразователя осуществляется за счет вольтодобавочного трансформатора, который перераспределяет активную и реактивную мощность таким образом, чтобы величина добавляемого напряжения полностью покрывала провал или отклонение напряжения в узле нагрузки. Функцию фильтра высших гармонических составляющих напряжения в данном устройстве может выполнять МИЭК, включенный по схеме фильтра.

Универсальный компенсатор – это устройство повышения качества электроэнергии, представляющее собой соединение и совместное использование СТАТКОМ и ДКИН [5]–[11]. На рис. 6 приведена его структура. Универсаль-

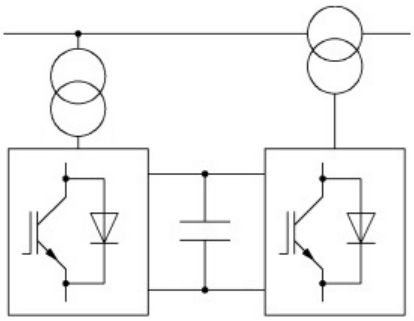


Рис. 6. Структура универсального компенсатора на основе СТАТКОМ и ДКИН

ный компенсатор способен выполнять функции как СТАТКОМ, так и ДКИН, таким образом, имея очень широкий функционал по повышению качества энергии. Одним из его недостатков является высокая стоимость. Данный компенсатор также можно усовершенствовать, использовав МИЭК в качестве LC-фильтров, входящих в СТАТКОМ и ДКИН.

Изучены основные типы устройств, предназначенных для повышения качества энергии, а также исследована возможность применения МИЭК для создания на его основе ФКУ. Это позволит снизить себестоимость изготовления, повысить надежность и улучшить массогабаритные показатели.

В дальнейших исследованиях планируется моделирование работы данных устройств с МИЭК в качестве фильтра, расчет и выбор оптимальных параметров МИЭК под конкретные задачи, анализ основных свойств и подробное изучение эффектов, которые могут быть достигнуты путем внедрения МИЭК.

Исследования выполнены на средства гранта Стипендии Президента Российской Федерации в 2022–2024 годах для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики. Грантополучатель Хазиева Регина Тагировна.

Приоритетное направление модернизации российской экономики (*направление конкурса № СП-2022 Совета по грантам Президента Российской Федерации*) *«Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива». Тема исследований «Разработка и исследование фильтрокомпенсирующего устройства для повышения качества электроэнергии».*

Список источников

1. *Саттаров Р. Р., Хазиева Р. Т., Иванов М. Д.* Integrated LC-Components for Electrical Systems and Devices // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon): 24–26 Sept. 2021, Magnitogorsk, Russian Federation.

2. *Сычев Ю. А.* Фильтрокомпенсирующие устройства с активными преобразователями для повышения качества электроэнергии в электротехнических комплексах нефтегазовых предприятий: дис. … канд. техн. наук: 05.09.03. СПб., 2021. 365 с.

3. *Конесев С. Г., Хазиева Р. Т., Кириллов Р. В.* Assessment of operating modes of hybrid electromagnetic elements in the inductive-capacitive converters // Journal of Physics: Conference Series, 2019. Vol. 1210. P. 012068.

4. *Конесев С. Г., Хазиева Р. Т.* Математическое и физическое моделирование индуктивно-емкостных преобразователей // Электричество. 2020. № 1. С. 32–38.

5. *Абрамович Б. Н., Сычев Ю. А., Мингазов А. С.* О компенсации высших гармоник тока и напряжения, создаваемых источником бесперебойного питания // Нефтяное хозяйство. 2013. № 10. С. 126–127.

6. *Гиршин С. С., Владимиров Л. В.* Методы расчета и оптимизации электроэнергетических систем: конспект лекций. Омск., 2010. 48 с.

7. *Варганова А. В.* О методах оптимизации режимов работы электроэнергетических систем и сетей // Вестник ЮУрГУ. 2017. Т 17. № 3. С. 76–85.

8. *Кузнецов Р. В., Федотов Е. А.* Применение динамических компенсаторов искажений напряжения для повышения надежности системы электроснабжения // Проблемы энергетики. 2013. № 3–4. С. 82–88.

9. *Абрамович Б. Н., Муратбакеев Э. Х., Медведев А. В.* Минимизация ущерба при добыче нефти из-за кратковременных перерывов электроснабжения // Промышленная энергетика. 2009. № 7. С. 25–28.

10. *Hidayatullah N., Paracha Z., Kalam A.* Impact of Distributed Generation on Smart Grid Transient Stability. Smart Grid and Renewable Energy. 2011. Vol. 2. P. 99–109.

11. *Nageswara P., Mohan V., Veera R.* Harmonic Reduction in Hybrid Filters for Power Quality Improvement in Distribution Systems // Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 15th January 2012. Vol. 35 N 1. P. 44–55.

УДК 621.311 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-174-176**

А. В. Мухаметшин*
доцент
Р. Т. Хазиева*
кандидат технических наук, доцент
**Уфимский государственный нефтяной технический университет*

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ИСПЫТАНИИ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рассматривается проектирование источников испытательного напряжения для диагностики изоляции высоковольтного оборудования и разработанное техническое решение, предназначенное для определения тока с помощью измерительной схемой в составе испытательной установки.
Ключевые слова: *высоковольтное электрооборудование, испытание изоляции, повышенное напряжение, переменное синусоидальное напряжение, испытуемый объект.*

A. V. Mukhametshin*
Associate Professor
R. T. Khazieva*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**Ufa State Petroleum Technological University*

DEVELOPMENT OF A CIRCUIT FOR MEASURING ALTERNATING CURRENT WHEN TESTING THE INSULATION OF HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT

The article discusses the design of test voltage sources for diagnosing the insulation of high-voltage equipment and the developed technical solution designed to determine the current using a measuring circuit as part of a test equipment.
Keywords: *high voltage electrical equipment, insulation test, increased voltage, alternating sinusoidal voltage, test object.*

Для диагностики состояния и свойств диэлектрического материала, выполняющего электроизоляционные функции в составе высоковольтного электрооборудования согласно требованиям нормативной документации выполняют испытания. В частности, обязательным является испытание повышенным переменным напряжением частотой 50 Гц [1]–[3]. Авторами предлагается техническое решение резонансной испытательной установки, обладающей улучшенными массогабаритными свойствами, в которой реализуется функция источника высокого переменного напряжения [4]–[7]. Структурная схема разработанного технического решения представлена на рис. 1.

Лабораторный стенд, собранный для изучения параметров и характеристик разработанного схемотехнического решения, представлен на рис. 2.

Авторами разработан алгоритм (рис. 3), согласно которому проводились испытания по схеме, изображенной на рис. 4.

Авторами разработан и реализован опытно-промышленный образец (рис. 5), предназначенный для измерения переменного тока. Данное устройство используется при проведении испытания изоляции переменным напряжением частоты 50 Гц. Цифрами 1 и 2 обозначены платы № 1 и 2 соответственно. Разработанное схемо-

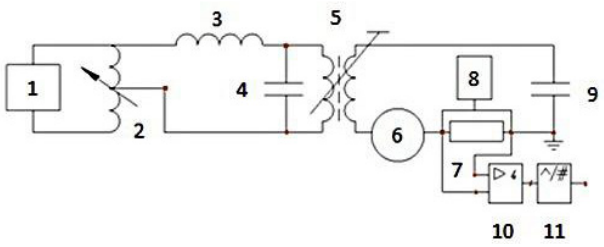


Рис. 1. Схема замещения разработанного технического решения: 1 – напряжение питания; 2 – регулятор напряжения; 3 –дроссель; 4 – конденсатор; 5 – испытательный трансформатор; 6 – образцовый прибор, 7 – прецизионный резистор; 8 – осциллограф; 9 – емкость испытуемого объекта; 10 – усилитель; 11 – АЦП

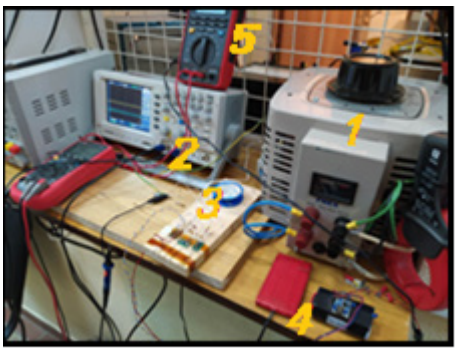


Рис. 2. Лабораторный стенд: 1 – лабораторный автотрансформатор; 2 – осциллограф; 3 – усилитель; 4 – источники опорного напряжения; 5 – мультиметр

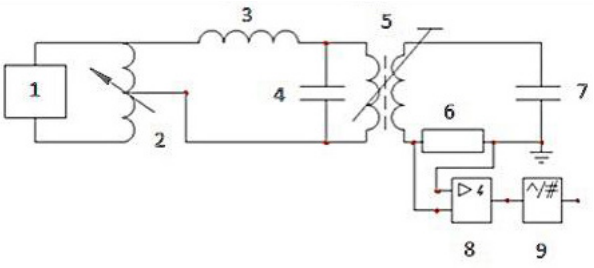


Рис. 4. Схема измерения переменного тока, протекающего через испытуемый объект: 1 – напряжение питания; 2 – регулятор напряжения; 3 –дроссель; 4 – импульсный конденсатор; 5 –испытательный трансформатор; 6 – прецизионный резистор; 7 – емкость испытуемого объекта; 8 – усилитель; 9 – АЦП

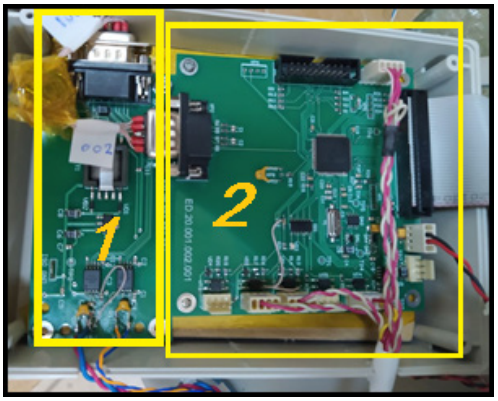


Рис. 5. Опытно-промышленный образец измерения тока

техническое решение обеспечивает возможность при испытании изоляции переменным напряжением от 25 В до 16 000 В частоты 50 Гц производить измерения тока в пределах от 1 до 320 мА В.

Внедрение данного образца позволит создать ряд цифровых измерительных миллиамперметров, позволяющих производить измерение переменного тока в высоковольтных испытательных установках для испытания изоляции объектов от 15 до 200 нФ в диапазоне от 1 до 1000 мА.

Исследования выполнены на средства гранта Стипендии Президента Российской Федерации в 2022–2024 годах для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики. Грантополучатель Хазиева Регина Тагировна.

Приоритетное направление модернизации российской экономики (направление конкурса № СП-2022 Совета по грантам Президента Российской Федерации) «Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива». Тема исследований «Разработка и исследование фильтрокомпенсирующего устройства для повышения качества электроэнергии».

Список источников

1. *Данилов А.* Современные промышленные датчики тока // Современная электроника. 2004. № 1. С. 26–28.

2. *Christian L.* Accurate High Direct Current Measurements for Industry. 2018 Conference on

Рис. 3. Алгоритм исследования схемы измерения переменного тока, протекающего через испытуемый объект

Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018). DOI: 10.1109/CPEM.2018.8500933.

3. *Kuerten G., Vasconcellos B.* Current Divider Based Impedance Comparator. 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018).

4. *Zhou L., Pan Y., Zhu L.* Sensitivity and drift value measurement of DC current comparator. 2019 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI).

5. *Burroughs C., Rüfenacht A., Cular S.* Automated Leakage Current Measurement Capability for Programmable Josephson Voltage Standards // 2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM).

6. Патент № 156457 РФ, МПК G01R. Установка для испытания средств защиты / А. В. Мухаметшин, Е. В. Мухаметшин. № 201524718; заявл. 23.06.15. Бюл. № 31.

7. *Хазиева Р. Т., Мухаметшин А. В., Горшенин А. И.* Исследование и разработка схемы измерения переменного тока при испытании изоляции // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2020. Т. 16. № 4. С. 46–55.

УДК 621.3, 62–83:001 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-177-181**

A. O. Pulatov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
M. F. Shamiyev*
PhD Student
**Tashkent State Technical University*

MODELING OF AN ENERGY EFFICIENT ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE IN THE MATLAB PROGRAM AND IMPLEMENTATION OF ENERGY EFFICIENT TECHNOLOGIES IN PUMPING STATIONS IN THE CITY WATER SUPPLY SYSTEM

The article deals with the modeling of an asynchronous electric drive as a means of improving energy efficiency and reliability of the pumping station for water supply of buildings and structures. An example of the operation of a pumping station with an energy-efficient asynchronous electric drive is given. Optimal algorithms for pump control are considered.
Keywords: *modeling of electrical drives, a soft start device, a frequency converter, energy saving, energy efficient asynchronous electric drive, pumping plant automation, service life increasing.*

Introduction

The current pace of urban infrastructure development, the construction of multi-storey buildings in the city center, various business centers, hotel complexes and skyscrapers leads to the need to solve the problems of their electrification and water supply. New modern buildings put into operation require continuous supply of water and electricity. For this distribution substations and pumping plants for water supply are being built in the immediate vicinity of the facility. The inclusion of these additional capacities in the existing electricity and water supply networks is a significant load on the existing electricity and water supply systems. This leads to the quality deterioration of power supply and drinkable water supply hitches at the new facility. In this regard, an integral part of the design and construction of new buildings are the issues of improving the reliability, quality and efficiency of resource use. when designing and modernizing new pumping stations, the right solution would be a preliminary calculation and simulation of the operation of pumping units and an electric drive. There are many software products for modeling the processes of electric drives. One of the well-known is the program MATLAB and Simulink.

Research and modernization object

Consumers will not be able to receive water in the required volume using the existing water supply system for urban buildings and structures. In this regard, modern systems of booster pumping plants are selected to provide the required volume and pressure of water. The pressure boosting pumping plant allows the facility to be supplied with water of the required pressure from the city water supply. As a rule, such a pumping plant consists of two or three (in some cases up to six) pumps and a control cabinet. The presence of a frequency converter ensures soft regulation of the pumps rotation speed and maintaining the required pressure value depending on the current water demand. Consider the operation of a pressure boosting pumping plant using the Tashkent city residential complex as an example. The pumping plant consists of three high-pressure centrifugal multistage pumps connected in one pipeline and a pump control cabinet. Pump model is GRUNDFOS PN-SN A96501910 type CR15–7 A-A-A-E-HQQE. Pressure H/H_{max} – 77.9/98.5m. Consumption – 17m^3/h. Drive motor power – 5.5kW, 3000rpm, 50Hz. The control cabinet is designed to control the pumps pressure by means of the pumps rotation speed frequency control. Provides stable maintenance of the set pressure and energy-efficient regulation of pumps when the water flow changes. The control cabinet contains a DANFOSS frequency converter, as well as additional protective and switching equipment. The operation of the pumping plant occurs automatically with pressure feedback on the pressure pipeline. If, during the operation, one pump is not enough, a special controller will give a command to connect an additional (next) pump. In this case, an additional pump is connected directly to the network. Thus,

Fig. 1. General view of the pumping plant control cabinet

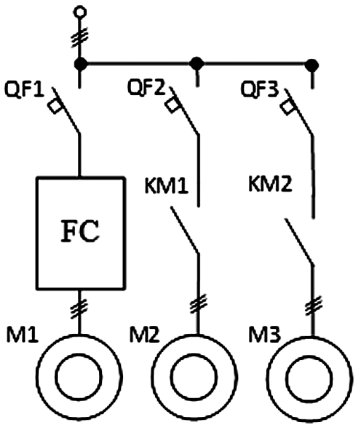


Fig. 2. Scheme of the pumping plant power part

the pumps are switched on one by one in order to ensure the required pressure in the pipeline network. Fig. 1 shows a general view of the control cabinet. Fig. 2 shows a single-line scheme of an existing pumping station before modernization, where FC is a frequency converter; M1, M2, M3 – asynchronous pump drive motors; QF1-QF3 – circuit breakers; KM1, KM2 – contactors.

Pumps that are connected directly to the network experience starting current inrush during pressure regulation, the value of which reaches 58–65A. In this case, the duration of the start is 0.3-0.5 seconds. In addition, there are sharp pressure drops that are felt by the consumer in the form of a change in water pressure at a level of 10–18 meters for 10–20 seconds, strong vibration of the pipeline network, frequent leaks and water breakthroughs.

If we measure the starting processes taking place in the pumping station, we can see these negative influences. Fig. 3 shows a model of an asynchronous electric drive with direct connection to the electrical network. Fig 4. Figure 4 illustrates the direct start transient curves. The graph shows changes in electromagnetic torque and speed. Values are given in p.u.

To avoid these disadvantages, it was proposed to introduce an energy-efficient asynchronous soft starter and water supply pumps control when designing water supply for houses, and replace the existing scheme of pumps start control directly from the network with an energy-efficient soft start and control system for the pumping unit. The UMP-2 energy-efficient soft start and control devices were additionally included in the power supply scheme for the pumps. The operation algorithms of these devices were developed and improved by the authors [2]. Fig. 5 shows the general view of an energy-efficient soft starter and

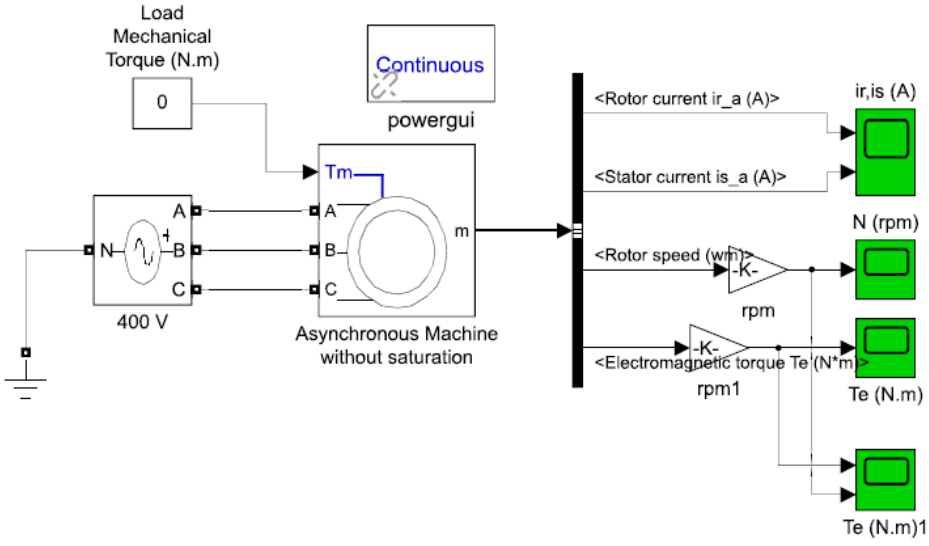


Fig. 3. Direct startup model of pumping motor

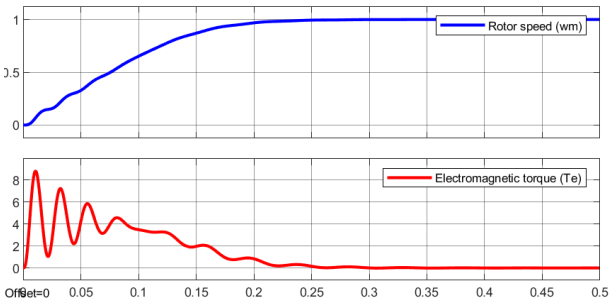


Fig. 4. Direct start transient curves

control device, fig. 6 – the modernized pumping plant power unit. Here, instead of the contactor group KM1, KM2, energy-efficient UMP-2 soft start and control devices, manufactured in Uzbekistan, are installed, which act as switching, protective and control equipment.

The operation of the automatic pressure and water supply control system did not fundamentally change the operation algorithm as a whole. The pumps are also switched, according to the inherent algorithm of the GRUNDFOS controller, but some features have appeared. The need for cold and hot water during the day is different, and varies widely. Three pumps operate during the maximum water flow period. The main tasks of the introduction of the energy-efficient soft start and pump control devices:

1. Ensuring soft start of the pumping unit. According to the scheme in Fig. 2 additional pumps are connected directly to the network. This contributes to the appearance of hydraulic shocks, high starting currents, etc. But, in the modernized

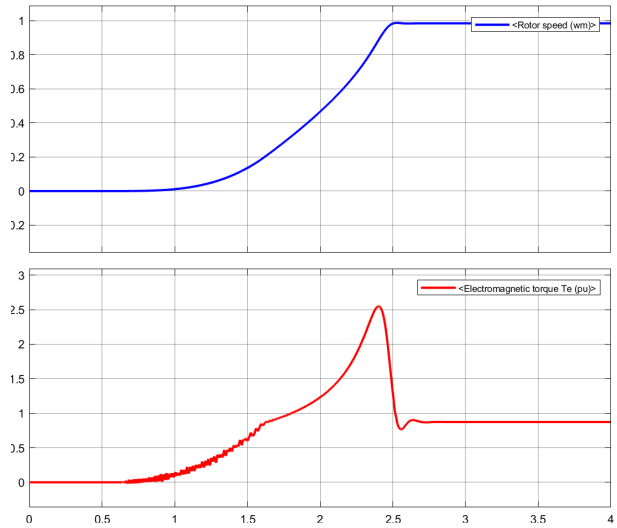


Fig. 6. Sofstarting curves transient curves

pump control scheme (Fig. 6), due to the optimal algorithm for changing the output voltage supplied to the input of the pump unit drive, UMP–2 devices make it possible to reduce starting currents by 2–3 times, to ensure soft acceleration of the asynchronous pump motor without jerks, and, in fact, without water hammer. During soft start, the pumping unit working blades do not experience the mechanical forces that are observed when starting directly from the net

work, and, accordingly, bearing assemblies and glands will last a longer period.

2. After the asynchronous motor acceleration and reaching the operating point by the pumping

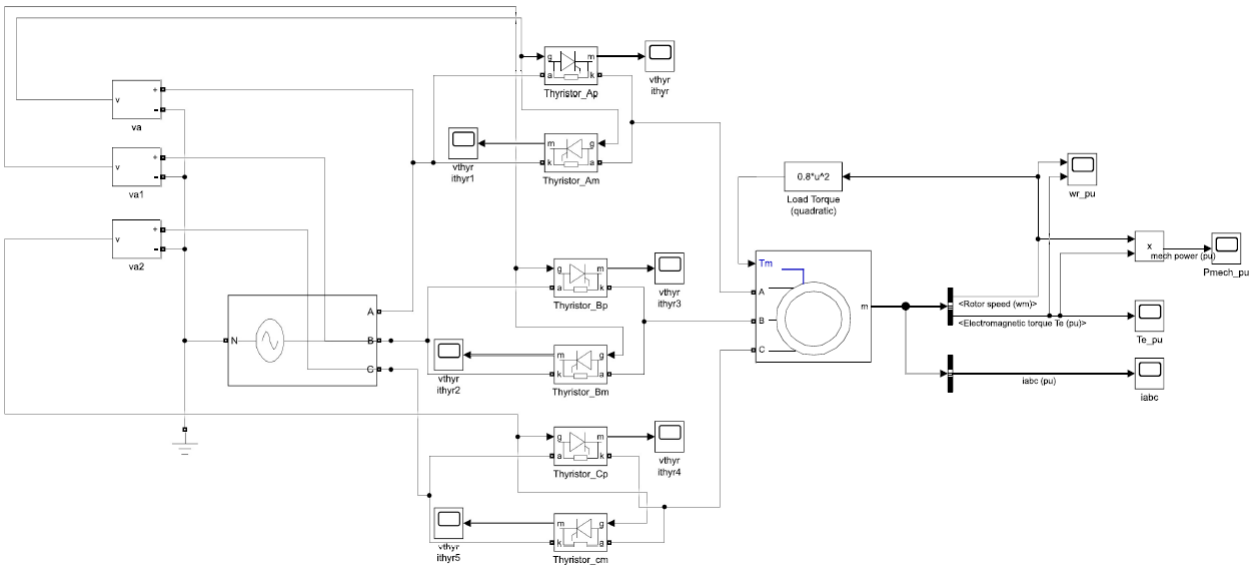


Fig. 5 Soft start model of pumping motor

Fig. 7. General view of the energy efficient soft start device

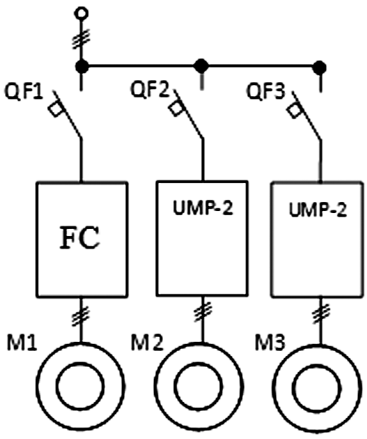


Fig. 8. Modernized scheme of the pumping plant

unit, the system starts to work in the operating mode, and with excess pressure in the pipeline, it reduces the rotational speed of the first pump unit using a frequency converter. In steady state, the UMP–2 system allows you to bring the asynchronous electric motor operation into a power saving mode by regulating the output voltage supplied to the electric motor.

The physical meaning of ensuring the asynchronous electric motor operation mode in an energy efficient mode is to ensure its operation under the condition:

$$\frac{\partial i}{\partial \varphi} = 0, \qquad (1)$$

where $i = \frac{I}{I_{nom}}$ – relative value of stator current, I and I_{nom} – present value and nominal value of stator current, respectively, $\varphi = \frac{F}{F_{nom}}$ – relative value of the magnetic field in the asynchronous electric motor air gap, F and F_{nom} – present value and nominal value of magnetic flux, respectively.

At the same time, taking into account that, $\Phi = f(U) =\sim kU$, we can represent the expression (1) in the form:

$$\frac{\partial i}{\partial u} = 0, \qquad (2)$$

where $u = \frac{U}{U_{nom}}$ – relative value of the motor stator voltage, U and U_{nom} – present value and nominal value of motor stator voltage, respectively.

Thus, we can ensure a minimum stator current of an induction motor with any load on the shaft.

Implementation results

A number of changes were made to the operation of the existing pumping plant for water supply of the Tashkent city residential complex, after the introduction of an energy-efficient soft start and asynchronous motor control device. In fact, the task of providing water was carried out according to the old scheme, but it had the disadvantages described above. After the modernization, all the disadvantages were eliminated and the operation of the water supply pumping plant control system became more efficient and reliable in terms of energy efficiency and resource saving.

The following results were obtained:

– starting currents reduction of the second and third pumps;

– pressure drop reduction from 10–18 meters to the level of 6–8 meters, which significantly reduced hydraulic impacts on the pipeline network;

– operating current reduction of the asynchronous motor.

The work results are summarized in table 1.

Table 1

Scheme	Pressure differential, m	Starting current, A	Motor voltage, V	Operating current, A	cosφ
Direct start 16–18		58–65	388	9.5–9.7	0.82–0.84
With energy-saving soft start device	6–8	25–33	372	9.1–9.3	0.86–0.89

The energy-efficient asynchronous electric drive systems proposed by the authors can be used not

only in the field of water supply, but can also be used in other areas of industry. The presence of a modern microprocessor base in the control system of energy-efficient soft start and control device, as well as a flexible control algorithm, allow them to be integrated into almost any complex of automatic control and regulation systems of technological processes.

References

1. *Chilikin M.* General course of the electric drive "Energoizdat". 1981.

2. *Khashimov A., Mirisaev A., Shamiyev M.* Patent RUz IAP20040393 Asynchronous electric drive.

3. *Syromyatnikov I.* Operating modes of asynchronous and synchronous motors "Energoatomizdat" 1984.

4. *Khashimov A., Mirisaev A., Kan L.* Energy-saving asynchronous electric drive "Fan va texnologiya" 2011.

5. *Pulatov A., Shaimiev M., Mirsaidov U.* Automation of production mechanisms using energy-efficient asynchronous electric drives based on intelligent converter technology Published under licence by IOP Publishing Ltd.

6. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 2388 // IV International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering 2022 (APITECH-IV 2022) 05/10/2022 – 08/10/2022 Bukhara, Uzbekistan, Citation A A Pulatov et al 2022 J. Phys.: Conf. Ser. 2388 012127.

7. *Pulatov A., Shaimiev M., Mirsaidov U.* Energy-efficient resource-saving soft starter for asynchronous electric drives International scientific and technical conference "Actual issues of energy efficiency of automated electromechanical and electrotechnological systems". Tashkent, 2022. P. 85–88.

8. *Pulatov A., Shaimiev M., Mirsaidov U.* Energy-saving asynchronous electric drive for continuous and cyclic mechanisms Scientific and Technical Conference of the Republic of Uzbekistan "Use of new types of alternative energy sources, innovative solutions and energy saving when using them", 2022. P. 475–476.

9. *Pulatov A., Bekmuradov J., Zaripov O.* Features of using linear graphs in developing mathematical model of metal melting process in induction crucible furnace 07002, Published online: 13 July 2021.

10. *Pulatov A., Mamadaliyev B., Mo'minov H.* Application of equivalent thermal circuits for calculation of thermal processes of induction cruel furnaces with a capacity of up to 1000 kg 07001, Published online: 13 July 2021.

11. Networked interactive solar panels over the roof photovoltaic system (PVS) and its cost analysis at Tashkent state technical University / E. Saitov, J. Toshov, A. Pulatov, B. Botirov. 2020.

12. *Pulatov A.* Energy-saving principles at the enterprises of public catering , E3S Web Conf.Volume 216, 2020 Rudenko International Conference "Methodological problems in reliability study of large energy systems" (RSES 2020).

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 004.896 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-182-185**

И. С. Афанасьев*
магистрант
С. С. Налегаев*
кандидат физико-математических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ В ОБЛАСТИ РОБОТОТЕХНИКИ

Рассмотрены основные задачи в области применения систем машинного зрения в сфере робототехники, выполнен анализ их существующих решений. В качестве примера приведены результаты использования алгоритмов компьютерного зрения для распознавания объектов на изображениях, полученных с использованием цифровой видеокамеры.
Ключевые слова: *робототехника, машинное зрение, отслеживание объектов, сегментация, оценка глубины.*

I. S. Afanasyev*
Postgraduate Student
S. S. Nalegaev*
PhD Sc. Phys.-Math., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

RESEARCH ON THE PARTICULARITIES OF MACHINE VISION SYSTEMS APPLICATION IN ROBOTICS

The main tasks in the field of machine vision systems application in robotics are considered, their existing solutions are analyzed. As an example, the results of utilization of computer vision algorithms for recognizing objects in images obtained with a digital video camera are presented.
Keywords: *robotics, computer vision, object tracking, segmentation, depth estimation.*

Введение

При управлении роботом он всегда исполняет некоторый заданный алгоритм. Алгоритмы призваны решать различные задачи. Основными задачами роботов, решаемыми с помощью алгоритмов, являются: поиск пути, машинное зрение, захват и манипуляции объектами. Рассмотрим основные имеющиеся на сегодняшний день алгоритмы, относящиеся к задачам машинного зрения, поскольку именно от правильности распознавания объектов окружающей среды зависит успешность остальных задач, выполняемых роботами, будь то передвижение самого робота или группы операций с целевыми объектами, таких как, например, поиск, обработка или перемещение целевых объектов из одного места в другое.

Алгоритмы машинного зрения

Поскольку большая часть применяемых на практике алгоритмов базируется на готовых библиотеках нейросетей, имеет смысл описать только их ключевой функционал, а непосредственное применение привести отдельно для библиотеки «OpenCV».

Для отслеживания объектов (трекинга)

Проще всего такие задачи решаются для фотоматериалов. Для видео (а роботам нужно именно видео) требуются серьезные вычислительные мощности по обработке кадров [1]. Наиболее распространенной библиотекой является «OpenCV» (разработана для Python).

Для сегментации и разделения

В отличие от трекинга изображений, достаточно лишь задать границы между объектами, примерно обозначив то, чем они являются. Зачастую задача решается вместе с отслеживанием объектов, поскольку роботу (например, беспилотному автомобилю), требуются все данные для принятия решений о том, куда и с какой скоростью ехать. Актуальны решения и для медицины, например, для определения и лечения опухолей [2]. Одна из наиболее функциональных библиотек Python для этих задач – «Scikit-image».

Для оценки расстояния до объектов

Правильнее называть эту задачу оценкой глубины. Решая эту задачу, робот находит на получаемом изображении препятствия на пути, оценивает расстояние до них и находит подходящую траекторию, чтобы их объехать, во избежание аварии [3]. Модель монокулярной оценки глубины GPLN из библиотеки «Transformers» успешно решает эту задачу.

Таким образом, наиболее актуальным в области алгоритмов искусственного интеллекта является язык программирования Python, поскольку именно на нем написано большинство библиотек программного кода для обработки видео, векторных и текстовых данных. Алгоритмы можно использовать как отдельно, так и совместно. Задачи, выполняемые роботами, комплексные и требуют всей полноты возможностей используемых инструментов для принятия и осуществления решений.

Объединяя и реализуя эти алгоритмы с любыми доступными алгоритмами перемещения, можно решить комплексные задачи по перемещению и принятию решений:

– ориентация в пространстве;

– принятие решений при перемещениях;

– захват и манипуляции объектами.

Решение этих задач является приоритетным для робототехники и становится возможным на текущем этапе развития технологий искусственного интеллекта.

Предположим, робот несет на борту фото- или видеокамеру с достаточным качеством записи изображений для распознавания объектов. В этом случае самый простой и наиболее значимый для практики случай – применение алгоритмов распознавания людей.

Использование библиотеки «ImageAI»

Библиотека «ImageAI», как правило, применяется с использованием других библиотек Python, суммарно требуя 9 дополнительных библиотек, которые перечислены ниже. Они устанавливаются с помощью системы управления пакетами «Python Package Index» (PIP). Использование библиотеки «ImageAI» невозможно без «OpenCV» [4]. Список из 9 библиотек:

1. «Tensorflow»
2. «Keras»
3. «Numpy»
4. «Pillow»
5. «Scipy»
6. «H5py»
7. «Matplotlib»
8. «Opencv-python»
9. «Keras-resnet»

После установки всех указанных выше пакетов библиотека «ImageAI» готова к работе. Ее основной класс «ObjectDetection» предоставляет функцию обнаружения объектов на любом заданном цифровом изображении или наборе изображений с использованием моделей, предварительно обученных на наборе данных «COCO». Поддерживаются модели «RetinaNet», «YOLOv3» и «TinyYOLOv3». С помощью этой библиотеки возможно обнаруживать и распознавать 80 различных типов повседневных объектов, начиная с людей и живых организмов и заканчивая автомобилями, ноутбуками и кружками и т. п.

Вначале рассмотрим результаты применения модели «RetinaNet» для распознавания людей на цифровых фотографиях. Пример исходного фото представлен на рис. 1.

Результаты применения модели «RetinaNet» представлены на рис. 2. Как видно из приведенного рисунка, наблюдается успешное распознавание стандартных объектов.

Далее рассмотрим результаты использования той же модели «RetinaNet», но для распознавания людей на видеоматериале (с цифровой видеокамеры). Для примера на рис. 3 и 4 представлен 1 кадр из всего записанного видеопотока – до и после распознавания.

Как видно из результатов на рис. 4, алгоритм успешно распознает людей на видео. Хотя, наблюдаются и ошибки, если человек частично, то есть более чем на 50 %, скрывается за другим объектом (например, на рис. 3 и 4 слева – скрывается за другим человеком).

Модель «RetinaNet» также способна автоматически распознавать и другие типы объектов в видеопоследовательности (например, на рис. 2 представлен результат распознавания кружек и письменных ручек, а на рис. 4 – стульев) [5]. Данная нейросеть, помимо распознавания и локализации объектов (выделения их рамкой на

Рис. 1. Исходное изображение до распознавания объектов

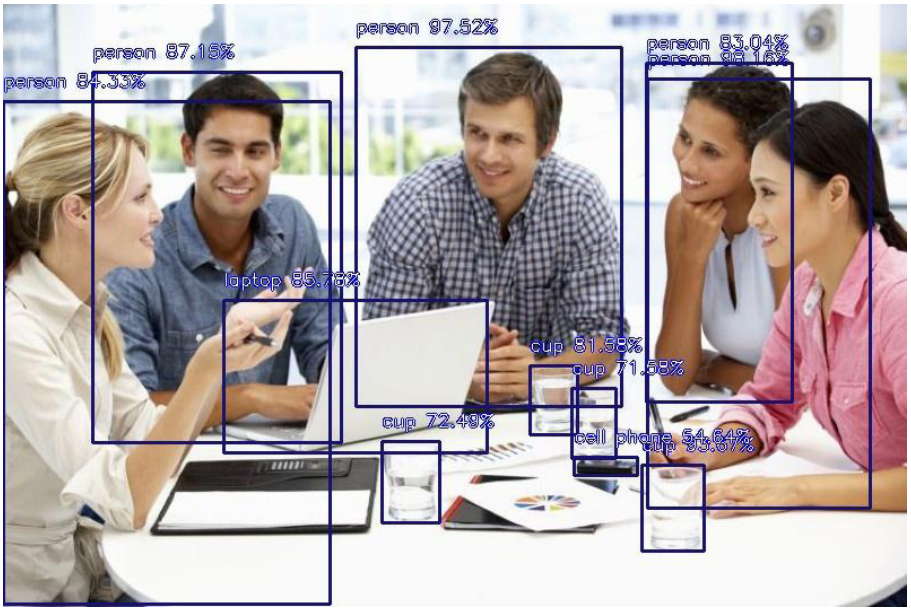


Рис. 2. Изображение с результатами распознавания модели «RetinaNet»

изображениях), может указывать вероятность (например, в процентах), отражающую оценки того, что найденный ей объект, действительно является искомым объектом, например, человеком.

При необходимости библиотека позволяет настраивать пороговые величины событий детектирования разных объектов. Можно задать низкую вероятность срабатывания, чтобы увеличить чувствительность для более важных объектов (например, людей), и поставить более высокую для менее важных (например, для бумаги, ручек и т. п.), что позволяет снизить число ложно положительных событий поиска этих объектов.

Распознавание лиц и различных объектов может быть полезно для использования роботов в местах, где есть множество людей или иных объектов, для которых необходимо строить траекторию их обхода при перемещении. К примеру, это могут быть склады, производственные помещения, открытое уличное пространство. Использование алгоритмов распознавания людей на базе цифровых видеокамер способно сде-

Рис. 3. Исходный фрагмент видео – до распознавания

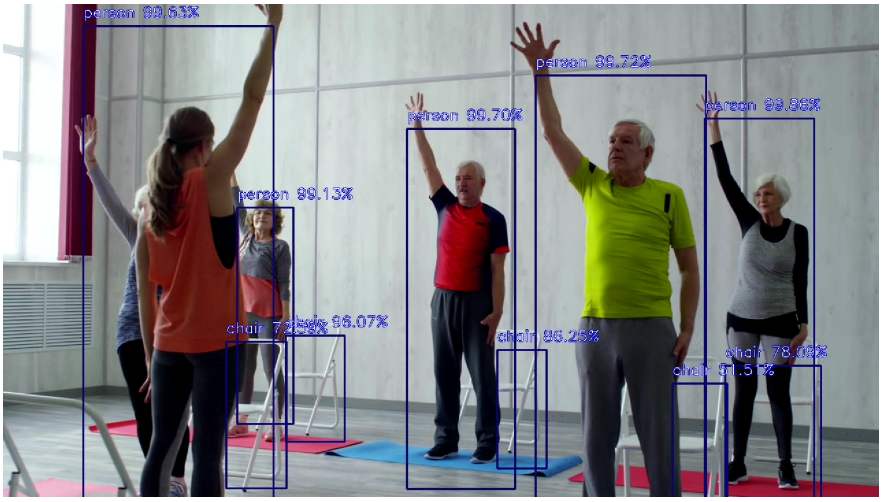


Рис. 4. Фрагмент видео после распознавания модели «RetinaNet»

лать роботов более безопасными, так как позволяет избегать несчастных случаев при их эксплуатации. Это также открывает возможности для разработки роботов на базе алгоритмов самостоятельного принятия решений, без необходимости постоянного управления оператором.

Список источников

1. *Zhou X., Koltun V., Krähenbühl P.* Tracking objects as points // European Conference on Computer Vision. Springer, Cham, 2020. P. 474–490.

2. *Dey S.* Hands-On Image Processing with Python: Expert techniques for advanced image analysis and effective interpretation of image data. Packt Publishing Ltd, 2018.

3. *Haseeb M.* DisNet: a novel method for distance estimation from monocular camera // 10th Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles (PPNIV18), IROS. 2018.

4. *Khan M.* Face detection and recognition using OpenCV // 2019 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS). IEEE, 2019. P. 116–119.

5. *Aparna R.* Video Analytics-based Ingredient Detection for Smart Chef using YOLOv3 and ImageAI // 2021 International Conference on Recent Trends on Electronics, Information, Communication & Technology (RTEICT). IEEE, 2021. P. 573–578.

УДК 681.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-186-189**

М. С. Брунов*
старший преподаватель
Е. Ю. Ватаева*
старший преподаватель
Н. Л. Гречкин*
ассистент
В. Ф. Шишлаков*
доктор технических наук, профессор
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ САУ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТОЧНОСТИ АППРОКСИМАЦИИ НЕЛИНЕЙНОГО ЗВЕНА

Рассматривается система автоматического управления при наличии статической нелинейности. Предполагается параметрический синтез регулятора системы обращенным методом Галеркина. В рамках указанного алгоритма рассматривается аппроксимация нелинейного элемента полиномами разной степени. Исследуется точность аппроксимации при разных видах аппроксимирующей полиномиальной функции. Для получения желаемой модели используется идентификация методом наименьших квадратов. Приводятся результаты вычислительных экспериментов в MatLab, подтверждающие эффективность рассмотренной методики.
Ключевые слова: *полиномиальная аппроксимация, нелинейные системы, обобщенный метод Галеркина, метод наименьших квадратов.*

M. S. Brunov*
Senior Lecturer
E. Y. Vataeva*
Senior Lecturer
N. L. Grechkin*
Assistant
V. F. Shishlakov*
Dr. Sc. Tech., Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

RESEARCH OF THE ACS DYNAMICS WITH A CHANGE IN THE APPROXIMATION ACCURACY OF A NONLINEAR UNIT

An automatic control system is considered in the presence of static nonlinearity. The parametric synthesis of the system controller is assumed by the inverted Galerkin method. This algorithm considers the approximation of a nonlinear element by polynomials of different degrees. The approximation accuracy is studied for different types of approximating polynomial function. To obtain the desired model, least squares identification is used. The results of computational experiments in MatLab are presented, confirming the effectiveness of the considered technique.
Keywords: *polynomial approximation, nonlinear systems, generalized Galerkin method, least squares method.*

В реальном мире все системы, если рассматривать в широком диапазоне работы, являются нелинейными. Для качественного решения задачи синтеза нелинейных систем автоматического управления (САУ) необходимо построение адекватной математической модели, данный вопрос в свою очередь, связан с правильно подобранным методом аппроксимации нелинейного элемента [1], [2]. К примеру, при параметрическом синтезе нелинейных систем обращенным методом Галеркина, на одном из этапов применяется аппроксимация нелинейных элементов различными функциями, что позволяет формулировать рекуррентные алгоритмы расчета в процессе синтеза. Достаточно полно и виды аппроксимаций для нелинейных элементов систем автоматического управления рассмотрены в работах [3]–[5], в данной работе рассматривается полиномиальная аппроксимация. Для получения желаемой модели используется идентификация методом наименьших квадратов.

Рис. 1. Схема для получения исходных данных для идентификации

На первом этапе производится имитация экспериментальных данных в программе *MatLab*/*Simulink*. Схема получения исходных данных для эксперимента приведена на рис. 1.

Исходные данные для идентификации, представляющие собой массивы входных и выходных данных (синусоида и результат ее прохождения через блок насыщения), показаны на рис. 2.

Для построения модели нелинейного звена будем, используем полином с 5-й степени. Результаты моделирования показывают, что в данном случае четные степени мало влияют на точность аппроксимации, поэтому будем использовать только нечетные.

Проиллюстрируем предлагаемую методику на простом примере. Пусть задана непрерывная система с ПИД регулятором, содержащую статическую нелинейность, как показано на рис. 4.

Запустив схему, получим в рабочей области *MatLab* массивы, соответствующие сигналам на входе и выходе нелинейного звена (рис. 5).

После этого проведем идентификацию нелинейности методом наименьших квадратов, результат представлен на рис. 5.

Далее необходимо сравнить переходные процессы в исходной системе и в системе с аппроксимированной нелинейностью. Для этого соберем схему, представленную на рис. 6. На рис. 7 приведена аппроксимированная нелинейная характеристика полиномом 3 порядка. На рис. 8 приводится сравнение выходов систем, первая

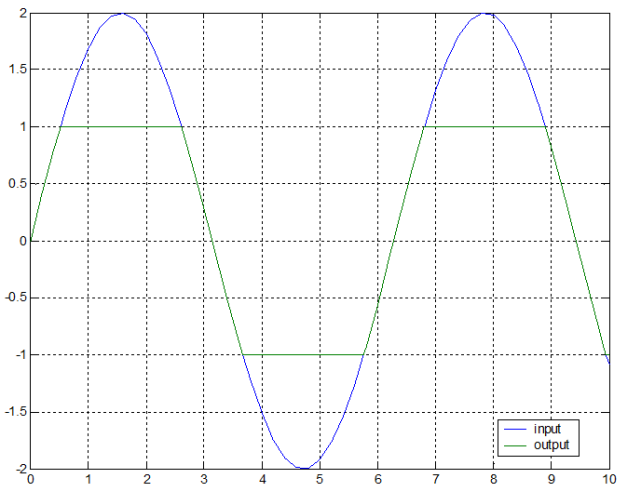


Рис. 2. Визуализация исходных данных

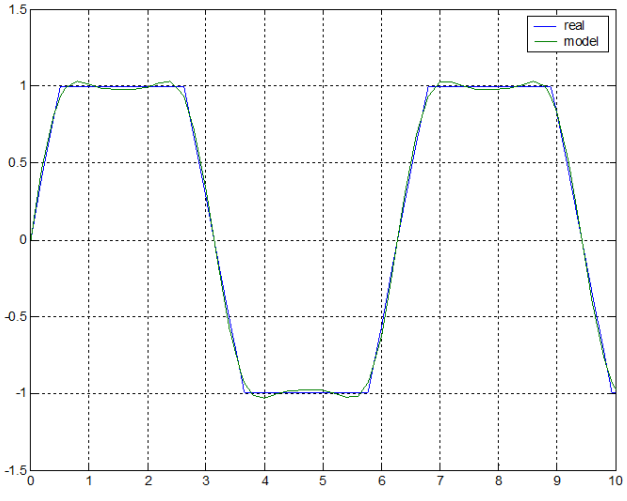


Рис. 3. Сравнение объекта и модели при аппроксимации нелинейности полиномами 5-го порядков (только нечетные степени)

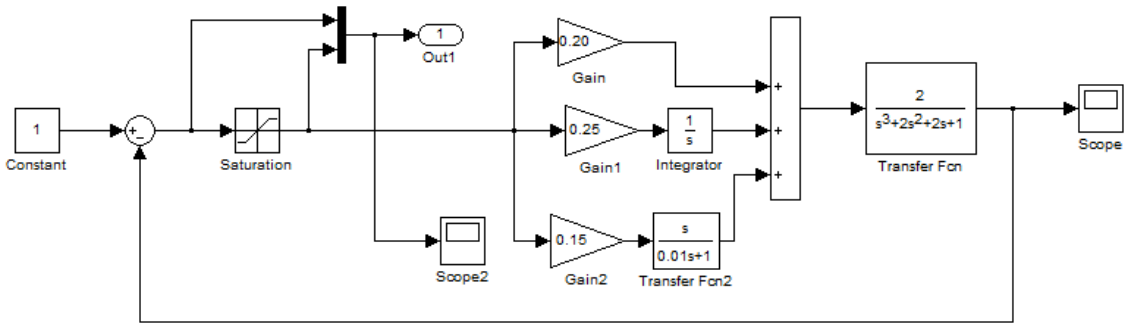


Рис. 4. Схема для идентификации нелинейности МНК

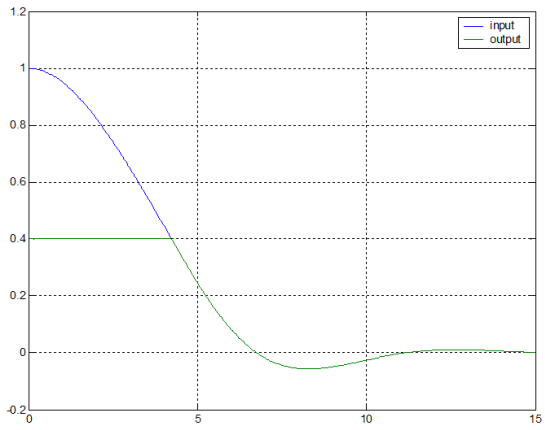


Рис. 5. Вход и выход нелинейного звена (исходные данные для идентификации)

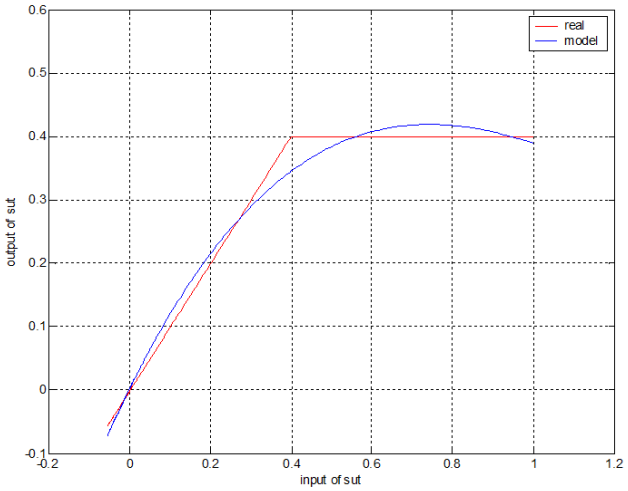


Рис. 6. Зависимость выхода нелинейности от ее входа (для нелинейного звена и модели, полученной при идентификации)

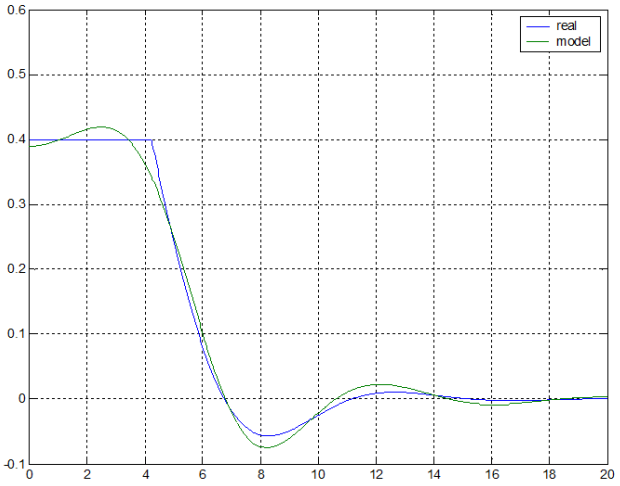


Рис. 8. Сравнение сигналов на выходе нелинейностей

из которых содержит идеальную нелинейность, а вторая – ее аппроксимацию. Отличие выходов визуально практически заметно. Таким образом, ошибки аппроксимации статических нелинейностей не приводят к заметному изменению выхода системы (рис. 9).

В работе проиллюстрирован простой способ аппроксимации статических нелинейности полиномами. Для получения исходных данных для идентификации используются сигналы со входа и выхода нелинейности путем моделирования в *Simulink*. На следующем этапе проводится идентификация методом наименьших квадратов. В результате получается модель нелинейности в виде полинома заданного порядка. Результаты предназначены для использования в алгоритмах параметрического синтеза обращенным методом

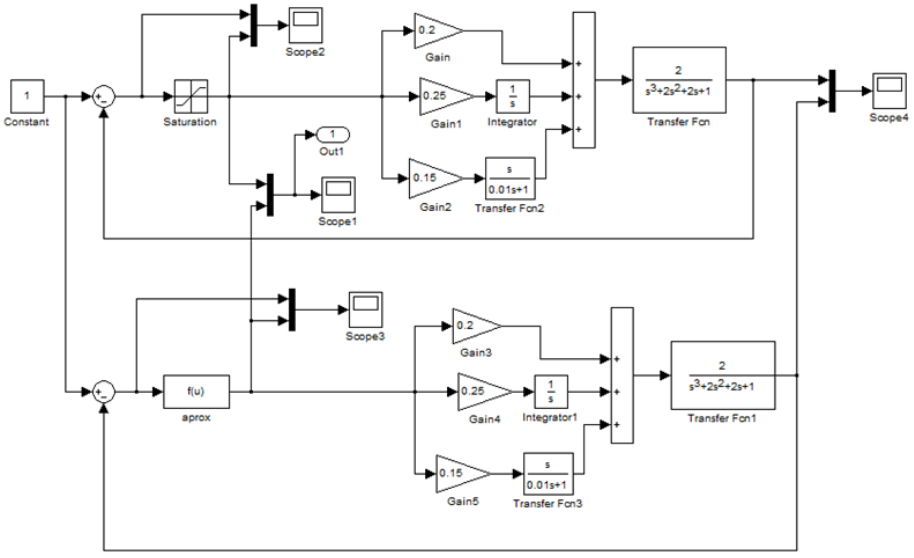


Рис. 7. Схема для сравнения систем при аппроксимации нелинейности

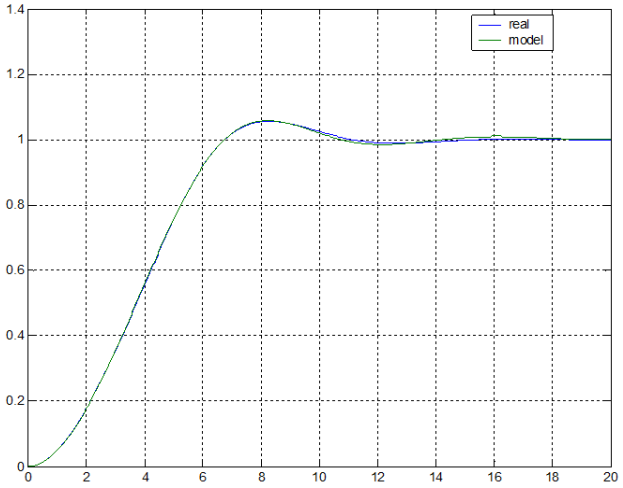


Рис. 9. Сравнение сигналов на выходе систем

Галеркина. Приведены примеры моделирования в пакете *MatLab*/*Simulink* иллюстрирующие применение описанного подхода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Список источников

1. *Khalil H.* Nonlinear Systems, USA, 2013. 560 p.

2. New Trends in Nonlinear Control Systems and Applications / L. Zhitao, H. Deqing, X. Yifan et al // Abstract and Applied Analysis. 2015. 1–2. 10.1155/2015/637632.

3. *Шишлаков В. Ф., Шишлаков А. В., Тимофеев С. С.* Синтез САУ при различных видах аппроксимации нелинейных характеристик: теория и практика: монография. СПб.: ГУАП, 2017. 151 с.

4. *Никитин А. В., Шишлаков В. Ф.* Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: монография. СПб.: ГУАП, 2003. 358 с.

5. Synthesis of control laws of electromechanical systems under polynomial approximation of characteristics of nonlinear elements / V. Shishlakov, E. Vataeva, N. Reshetnikova et al // 13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings», 2018. Vol. 161 (2). P. 02006.

УДК 004.91 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-190-193**

В. В. Булатов*
кандидат технических наук, доцент
Р. А. Владимиров*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ О НЕИСПРАВНОСТЯХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Представлена система, которая дает возможность автоматизировать процесс сбора данных о неисправностях технических систем на базе обработки первичной информации, поступающей в службы качества предприятий-изготовителей. Источником информации являются рекламации и акты выполненных работ по гарантийным обязательствам. Предлагаемый подход предполагает ввод данных в форму на базе интерфейса Windows Forms, что сокращает время обработки информации и унифицирует вводимые данные в систему ТОиР.
Ключевые слова: *рекламация, обработка данных, автоматизированная форма, программа сбора данных.*

V. V. Bulatov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
R. A. Vladimirov*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

SYSTEM FOR COLLECTING DATA ON MALFUNCTIONS OF TECHNICAL SYSTEMS

The article presents a system that makes it possible to automate the process of collecting data on malfunctions of technical systems based on the processing of primary information received by the quality services of manufacturing enterprises. The source of information is claims and certificates of work performed under warranty obligations. The proposed approach involves entering data into a form based on the Windows Forms interface, which reduces the processing time of information and unifies the data entered into the enterprise's maintenance and repair system.
Keywords: *reclamation, data processing, automated form, data collection program.*

При выявлении неисправности оборудования в гарантийный период эксплуатирующая организация направляет рекламационное письмо на предприятие-изготовитель.

Рекламация – письменное заявление потребителя установленной формы изготовителю (поставщику) на обнаруженные в период действия гарантийных обязательств дефекты и (или) несоответствие комплектности поставленных изделий требованиям ТУ, а также требование о восстановлении комплектности или замене дефектных изделий [1].

Важно помнить, что при оценке показателей надежности, таких как наработка на отказ и среднее время восстановления, рекламация является первоисточником.

Предприятие-изготовитель обязательно должно вести рекламационную деятельность – анализ характера и причин возникновения несоответствий выпускаемой продукции и разработку корректирующих и предупреждающих мероприятий.

Алгоритм проведения рекламационной работы по гарантийным обязательствам представлен в работе [2].

В настоящее время на рынке существует ряд программных решений, направленных на сбор и первичную обработку данных рекламаций. Прежде всего, это 1С ТОиР и PTC Windchill. Функциональные возможности этих систем подробно рассмотрены в работе [2].

Помимо этого, авторами [3] разработано мобильное приложение для ввода данных о неисправностях «в поле».

Данная работа является продолжением указанных выше материалов и направлена на разработку стационарной формы ввода данных о неисправностях, то есть формы, которая будет

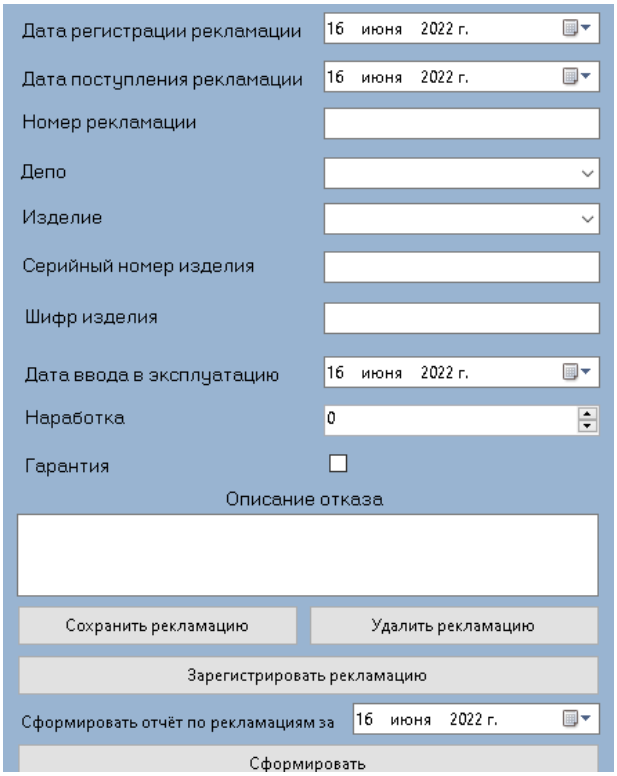


Рис. 1. Поле регистрации рекламации

установлена на ПЭВМ службы качества предприятия-изготовителя.

Простейшим примером реализации системы учета рекламаций является табличный редактор MS Excel. Однако при использовании такого подхода неизбежны ошибки ввода оператора, которые потребует дополнительного времени проверки исходных данных инженером по надежности.

В качестве среды разработки была выбрана Visual Studio 2022. Community версия программы бесплатна, имеет удобный интерфейс и при этом обладает широкими возможностями для разработки прикладных программ на актуальных языках программирования.

Для разработки программы сбора данных по рекламациям была использована открытая платформа Microsoft NET 6.0, которая представляет собой бесплатную унифицированную среду разработки с открытым исходным кодом, позволяющую создавать веб-приложения, бессерверные функции в облаке, полностью облачные приложения, мобильные приложения, классические приложения Windows WPF и Windows Forms [4].

В качестве платформы пользовательского интерфейса была выбрана Windows Forms. На базе Windows Forms можно разрабатывать графически сложные приложения, которые просто развертывать, обновлять и с которыми удобно работать как в автономном режиме, так и в сети онлайн [5].

Рассмотрим реализацию программы сбора данных об неисправностях на примере отказов оборудования пассажирских вагонов.

Для регистрации рекламации в базу данных будут использоваться такие поля ввода информации как:

– дата регистрации рекламации;
– дата поступления рекламации;
– номер рекламации;
– депо;
– наименование изделия;
– серийный номер изделия;
– шифр изделия (согласно конструкторской документации на изделие);
– дата ввода в эксплуатацию;
– наработка в установленных единицах;
– гарантия (есть или нет);
– описание отказа;
– результаты осмотра (согласно акту выполненных работ);
– элемент отказа;
– описание мероприятия;
– тип мероприятия;
– дата акта выполненных работ.

Разработанное поле регистрации информации, учитывающее указанные выше пункты, представлено на рис. 1.

Далее была создана база данных на основе технологии Entity Framwork Core. Здесь создаются классы для выпадающих списков «Депо» и «Изделие». Также создается класс «Complaint» для переноса данных рекламаций в базу данных. В итоге получаем рабочую область программы с выводом базы данных (рис. 2). После ввода данных в поля и нажатия кнопки «сохранить рекламацию», все введенные данные будут перемещены в базу данных и будут выводиться в правом диалоговом окне программы.

В программе реализовано формирование отчетов. Для этого выбирается диапазон или конкретная дата регистрации рекламации и формируется отчет в формате doc. Если за выбранную дату существуют зарегистрированные рекламации, то появляется оповещение пользователю об успешном формировании отчета, в противном случае появится оповещение о неудавшемся формировании отчета (рис. 3).

Пример сформированного отчета по рекламациям представлен на рис. 4.

К недостаткам разработанного предложения можно отнести привязку программы к конкретной операционной системе и рабочей станции.

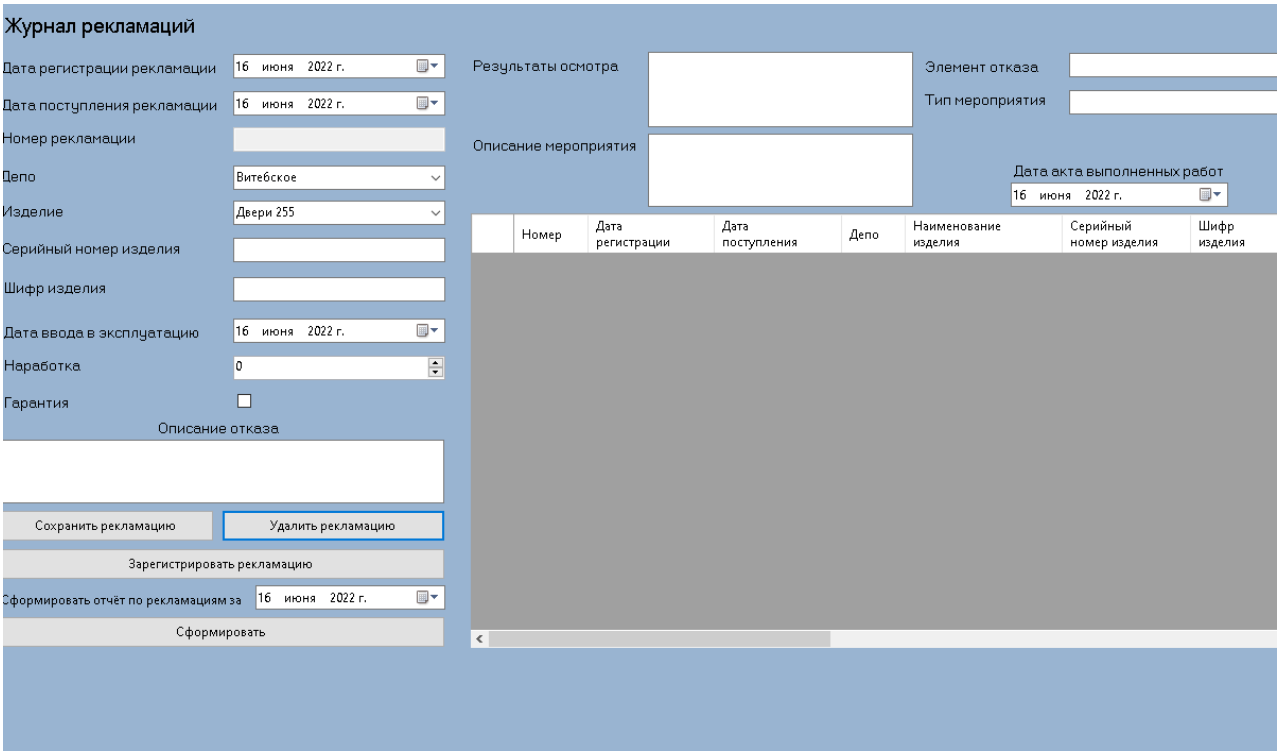


Рис. 2. Рабочая область программы с выводом базы данных

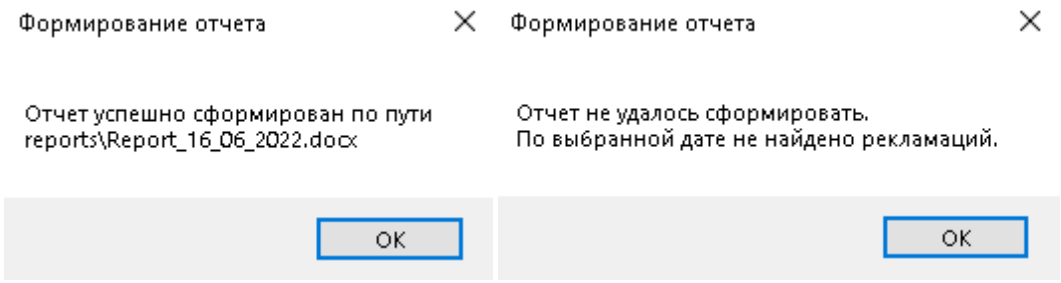


Рис. 3. Оповещения о формировании отчета

Отчет по рекламациям

за 16.06.2022

Номер / Гарантия	Дата регистрации / Дата поступления	Депо / Наименование изделия	Серийный номер / Шифр изделия	Наработка / Дата ввода в эксплуатацию	Описание отказа	Результаты осмотра / Элемент отказа	Тип / Описание мероприятия	Дата акта выполненных работ
15 / Нет	16.06.2022 / 16.06.2022	Московское / Двери BODE	2517013 / 13226	555,00 / 16.06.2022	Не закрывается	Сломано/	/	16.06.2022
16 / Есть	16.06.2022 / 16.06.2022	Ладожское / Двери 255	1735600 / 25075	8000,00 / 16.06.2022	Не открывается	Заело/	/	16.06.2022

Рис. 4. Отчет по рекламациям

Выводы

Разработанный программный модуль позволяет автоматизировать процесс сбора и первичной обработки данных по рекламациям и актам выполненных работ. Программа предназначена для стационарного использования службами качества предприятий-изготовителей изделий

для вагоностроения. Дальнейшим направлением развития системы будет реализация расчета показателей надежности изделий по требуемому закону распределения.

Список источников

1. ГОСТ Р 55754-2013. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники. Система взаимоотношений изготовителей и потребителей. Введ. 2015.01.01. М.: Стандартинформ, 2016. 16 с.

2. *Белоусова М. В., Булатов В. В.* Автоматизация процесса обработки данных рекламаций на предприятиях машиностроения // Завалишинские чтения'19: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2019. С. 135–140.

3. Программа ввода данных о выполненных работах по гарантийным обязательствам / В. В. Булатов, Ф. А. Назаренко, С. В. Солёный, В. Ф. Шишлаков, О. Я. Солёная. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611673, заявка № 2020610856 от 31.01.2020.

4. Документация по .NET. URL: https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/ (дата обращения: 08.12.2022).

5. Руководство по классическим приложениям (Windows Forms .NET). URL: https://learn.microsoft.com/ru-RU/dotnet/desktop/winforms/overview/?view=netdesktop–6.0 /(дата обращения: 08.12.2022).

УДК 681.3 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-194-197**

В. Л. Бурковский*
доктор технических наук, профессор
С. А. Ткалич*
кандидат технических наук, доцент
А. С. Ткалич*
студент
**Воронежский государственный технический университет*

СИСТЕМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИОРИТЕТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Рассматривается задача построения системы принятия решения в безаварийных АСУТП с прогнозированием. Представлен алгоритм модуля принятия решения на основе приоритетного регулирования. Проблема рассмотрена в приложении к изучению дисциплины «Компьютерные технологии управления в технических системах» для магистров направления 27.04.04 «Управление в технических системах» (магистерская программа «Методы интеллектуального управления в технических системах»).
Ключевые слова: *аварийная ситуация, технологический процесс, прогнозирование, композиционная модель, интегральный критерий, приоритетный регулятор.*

V. L. Burkovsky*
Dr. Sc. Tech., Professor
S. A. Tkalich*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. S. Tkalich*
Student
**Voronezh State Technical University*

DECISION-MAKING SYSTEM BASED ON PRIORITY REGULATION

The task of building a decision-making system in the structure of automated systems of accident-free control of technological processes with forecasting is considered. An algorithm for decision-making module based on priority control is proposed. The problem is considered in application to study of discipline «Computer technologies of control in technical systems» for masters of direction 27.04.04 «Control in technical systems» (master's programme «Methods of intellectual control in technical systems»).
Keywords: *emergency situation, technological process, prediction, composite model, integral criterion, priority regulator.*

Введение

При разработке систем безаварийного управления и высоконадежных АСУТП бывает недостаточно только статистических данных [1], [2]. Теория надежности и расчеты вероятности дают лишь сравнения некоторых вариантов повышения безопасности сложных технических систем [3]–[5]. Применение функции работоспособности на основе функционально-параметрического подхода возможно лишь при непосредственном определении критических параметров [6], [7]. Оперативно-календарное планирование, как обособленный инструмент, дает только технологическое решение о целесообразности проведения обслуживания [8]–[10].

Технология предупреждения отказов технических систем ответственного назначения на основе традиционных моделей и методов принятия решений нацелена на предотвращение внезапных отказов [11], [12].

Рассматриваемая система принятия решения строится на основе интегрального критерия безаварийного управления (ИКб/аУ) [13]

$$S = \begin{cases} S_1, & A = 0; \\ S_2, & A = 1, t_{запаса} \geq t_{прив}; \\ S_3, & A = 1, t_{запаса} < t_{прив}, \end{cases}$$

где S_1, S_2, S_3 – одноразрядные дискретные показатели текущего состояния аварийности технологического процесса. Принимают значения

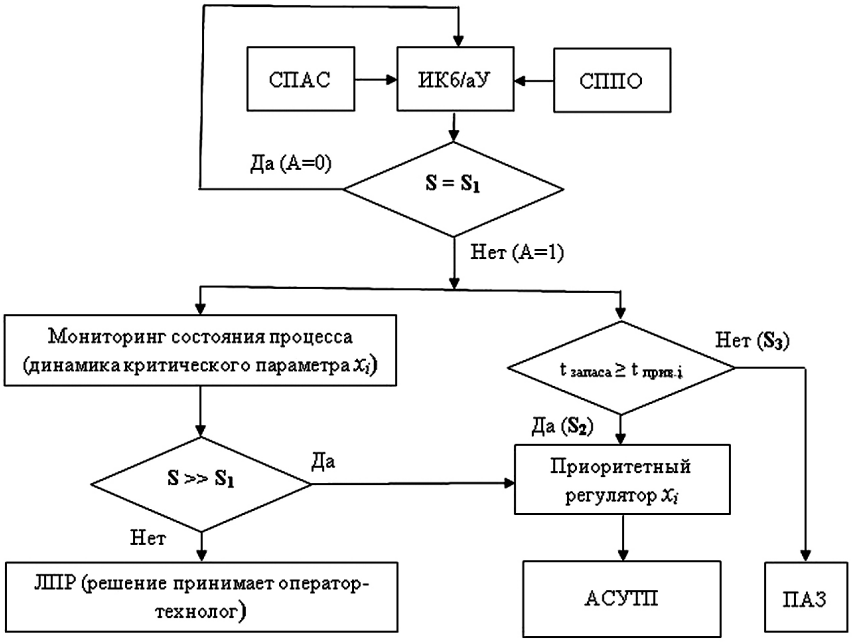


Рис. 1. Архитектура системы принятия решения

0 или 1. Одновременно они не могут быть все нулями или единицами. Единичное значение может принимать только один из них.

При S_1=1 состояние процесса считается нормальным. Контролируемые параметры находятся в допустимых пределах и не превышают критических значений. При этом система прогнозирования *аварийных ситуаций (СПАС) дает отрицательный прогноз на аварию* A=0.

При S_2=1 состояние процесса считается предаварийным. СПАС дает положительный прогноз на аварию A=1, поскольку какой-то из контролируемых параметров приближается к граничному максимальному или минимальному значения. При этом противоаварийная защита (ПАЗ) еще не включается, поскольку имеется запас времени $t_{\text{запаса}}$ до наступления прогнозируемой аварии, которое превышает время приведения этого параметра в норму по его каналу регулирования $t_{\text{прив}}$, то есть справедливо неравенство $t_{\text{запаса}} \geq t_{\text{прив}}$. Таким образом, имеется возможность вернуть процесс из состояния S_2 в состояние S_1.

При S_3=1 состояние процесса считается аварийным. Такое состояние процесса характеризуется как персистентное. Это возможно по двум причинам:

1) процесс стал неуправляемым;

2) СПАС дает положительный прогноз на аварию A=1, и запаса времени $t_{\text{запаса}}$, который формируется СПАС, не хватает на приведение критического параметра к норме, то есть справедливо неравенство: $t_{\text{запаса}} < t_{\text{прив}}$.

Таким образом, нет возможности вернуть процесс в состояние S_1, включается ПАЗ и процесс останавливается.

Кроме того, *система планово-предупредительного обслуживания* (СППО) *контролирует* текущий ресурс $t_{\text{ресурса}}$ оборудования и корректирует $t_{\text{запаса}}$ с учетом времени ремонтно-восстановительных работ $t_{\text{р-в}}$.

Архитектура системы принятия решения

Архитектура системы принятия решения (СПР) представлена на рис. 1.

Для функционирования СПР необходимы данные системы прогнозирования СПАС и системы СППО, работа которых изложена в работах [14], [15]. На основе этих данных производится расчет интегрального критерия ИКб/аУ и определяются критические параметры.

Особенностью архитектуры системы принятия решения является приоритетный регулятор. Он выполняет функцию исполнительного элемента модуля принятия решения, непосредственно воздействующего на АСУТП.

При возникновении нештатной ситуации, а именно: при положительном прогнозе системы СПАС на аварию (A=1), и при достаточном времени запаса $t_{\text{запаса}}$ приоритетный регулятор возвращает технологический процесс в штатное состояние. Это происходит в автоматическом режиме. При этом параллельно отслеживается динамика критического параметра x_i, подтверждается работа приоритетного регуля-

тора, либо управление процессом принимает на себя лицо, принимающее решение (ЛПР) [16].

Алгоритм модуля принятия решения

Алгоритм модуля принятия решения на основе приоритетного регулирования представлен на рис. 2.

Опрос текущих значений параметров технологического процесса (опрос датчиков) происходит непрерывно в циклическом режиме.

Вычисление запаса времени $t_{запаса}$ системой СПАС и сравнение его со временем приведения $t_{прив}$ необходимо для определения возможности приведения процесса к номинальным пределам. Значения текущего технического ресурса оборудования $t_{ресурса}$ также контролируются системой СППО. Эти вычисления производятся в блоке расчета ИКБАУ. При этом происходит определение состояния процесса S.

При отсутствии прогноза на аварию (A=0) S=S_1 АСУТП работает в штатном режиме и нет

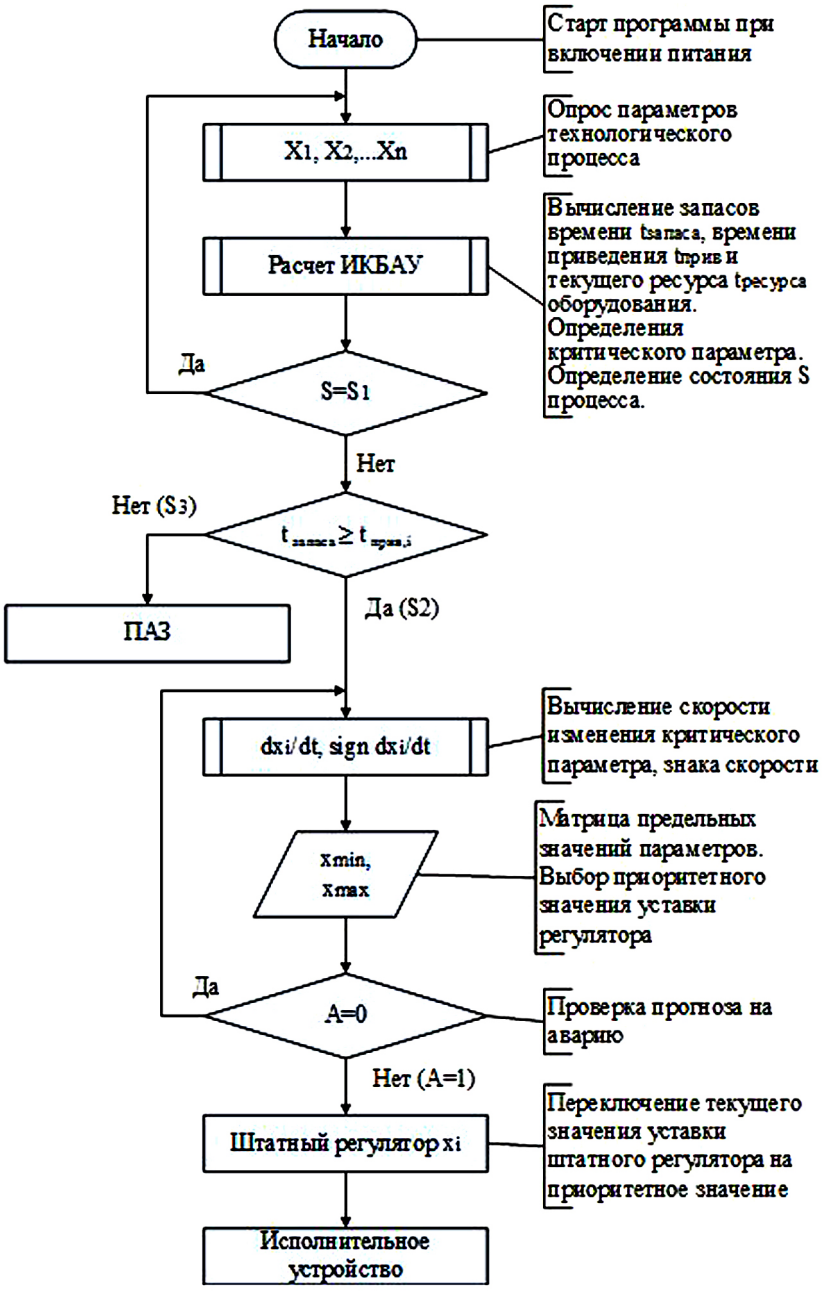


Рис. 2. Алгоритм модуля принятия решения на основе приоритетного регулирования

необходимости вмешательства в ее функционирование со стороны СПР и приоритетного регулятора.

При появлении положительного прогноза на аварию (A=1) выполняется сравнение времен, и, если $t_{\text{запаса}} \geq t_{\text{прив,i}}$, то $S=S_2$ и формируется процедура приоритетного регулирования.

Процедура начинается с вычисления скорости изменения критического параметра dx_i/dt и знака скорости sign dx_i/dt.

По признаку знака скорости sign dx_i/dt из матрицы предельных значений параметров выбирается значение уставки приоритетного регулятора $x_{i\min,i}$ или $x_{i\max,i}$, и происходит переключение текущего значения уставки штатного регулятора на приоритетное значение.

Целью процедуры приоритетного регулирования является скорейшее приведение критического параметра в нормированные пределы.

Также в процедуру приоритетного регулирования заложена циклическая проверка текущего состояния процесса – проверка прогноза на аварию (A=0). Это позволяет следить за эффективностью приоритетного регулирования, и в ситуации возвращения технологического процесса в состояние S_1, вернуться к штатному регулированию. По сути дела, регулирование происходит по релейному закону.

Заключение

Целью приоритетного регулирования является скорейшее приведение критического параметра в нормированные пределы в автоматическом режиме. Это определяется качественно новой архитектурой системы принятия решения на основе приоритетного регулирования. Особенностью архитектуры системы принятия решения является приоритетный регулятор, представляющий исполнительный элемент модуля принятия решения, непосредственно воздействующий на АСУТП.

Список источников

1. *Тюрин О. Г., Кальницкий В. С.* Принципы построения и практическая реализация высоконадежных АСУТП потенциально опасных производств // Автоматизация в промышленности. 2007. № 8. С. 14.

2. *Тюрин О. Г., Кальницкий В. С., Жегров Е. Ф.* Управление потенциально опасными технологиями: Монография. М.: Инфа-инженерия, 2011. 288 с.

3. *Глазунов Л. П., Грабовецкий В. П., Щербаков О. В.* Основы теории надежности автоматических систем управления. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 208 с.

4. *Дианов В. Н.* Диагностика и надежность автоматических систем. М.: МГИУ, 2004. 160 с.

5. *Гражданкин А. И., Лисанов М. В., Печеркин А. С.* Использование вероятностных оценок при анализе безопасности опасных производственных объектов // Безопасность труда в промышленности. 2001. № 5. С. 33–36.

6. *Рыков А. С.* Модели и методы системного анализа: принятие решений и оптимизация: учеб. пособие для вузов. М.: МИСИС, 2005. 352 с.

7. *Аноп М. Ф., Катуева Я. В.* Обеспечение безотказного функционирования уникальных технических систем на основе функционально-параметрического подхода // Труды междунар. симп. «Надежность и качество«. 2016. № 1. С. 146–148.

8. *Юрков Н. К.* К проблеме обеспечения безопасности сложных систем // Надежность и качество-2011: тр. междунар. симп.: в 2 т. Пенза: ПГУ, 2011. Т. 1. С. 104–106.

9. *Абрамов О. В.* К проблеме предотвращения аварий технических объектов ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 1. С. 11–16.

10. *Дуболазов В. А.* Оперативно-календарное планирование на промышленном предприятии. СПб.: СПГУ, 2000. 36 с.

11. *Леденева Т. М.* Модели и методы принятия решений: учеб. пособие. Воронеж, 2004. 189 с.

12. *Абрамов О. В.* Технология предупреждения отказов технических систем ответственного назначения // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 / Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. 2014. С. 7540–7545.

13. *Ткалич С. А.* Интегральный критерий безаварийного управления технологическими процессами // Системы управления и информационные технологии. 2009. № 4–1 (38). С.188–191.

14. *Tkalich S., Kravets O.* Composite Prognostication Model of Emergencies at the Hazardous Industrial Enterprises // International Journal on Information Technologies and Security. 2019. Vol. 11. N 2. P. 29–34.

15. *Ткалич С. А., Бурковский В. Л.* Оптимальное календарное планирование работ в системе безаварийного управления АЭС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 3. С. 16–20.

16. *Ткалич С. А.* Гибридная методика практической реализации системы принятия решений по приоритетному регулированию // Известия ЮФУ. Технические науки. 2021. № 7 (224). С. 31–40.

УДК 519.687.1 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-198-202**

А. Е. Городецкий*
доктор технических наук, профессор
В. Г. Курбанов**
кандидат физико-математических наук, доцент
И. Л. Тарасова*
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
**Федеральное Государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН)*
***Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СТРУКТУРА ЦЕНТРАЛЬНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ SEMS С ЭЛЕМЕНТАМИ ФОРМИРОВАНИЯ ПСИХИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Рассмотрено решение проблемы наделения интеллектуального робота свойствами, аналогичными психическим свойствам человека. Предложена новая структура центральной нервной системы робота с блоками, позволяющими учитывать психологию членов коллектива для обеспечения оптимального взаимодействия при выполнении совместных технологических операций.
Ключевые слова: *интеллектуальный робот, психика человека, центральная нервная система робота, бионический подход, структура центральной нервной системы робота.*

A. E. Gorodetskiy*
Dr. Sc. Tech., Professor
V. G. Kurbanov**
PhD Sc. Phys.-Math., Associate Professor
I. L. Tarasova*
PhD Sc. Tech., Senior Researcher
**Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences*
***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE STRUCTURE OF THE CENTRAL NERVOUS SYSTEM SEMS WITH ELEMENTS OF THE FORMATION OF MENTAL PROCESSES

Solving the problem of endowing an intelligent robot with properties like human mental properties. A new structure of the central nervous system of the robot with blocks that allow considering the psychology of team members to ensure optimal interaction when performing joint technological operations is proposed.
Keywords: *intellectual robot, human psyche, robot central nervous system, bionic approach, robot central nervous system structure.*

Введение

Для принятия решения по оптимальному управлению поведением интеллектуального робота (ИР) при коллективном взаимодействии в условиях большой неопределенности среды требуются новые методы, основанные на знании среды для выбора оптимальных действий и понимании возможных действий других членов коллектива [1]. Для этого ИР необходимо наделить ИР свойствами, аналогичными психическим свойствам человека. Очевидно, что психика роботов будет реализована на иной базе, чем психика человека. Тем не менее это будет все-таки психика, в том понимании, которое вкладывается в это понятие большинством психологов [2]. Ограниченность возможностей сенсорики и вычислительной мощности следует отнести к пресловутым ограниченным когнитивным способностям ИР [3]. Поэтому обеспечение роботов «органами чувств» и их совершенствование является очень важной и актуальной задачей.

Особенности центральной нервной системы робота с элементами психики

В настоящее время «органами чувств» робота являются различные датчики (перемещений, скоростей, ускорений, усилий, тактиль-

ные датчики и др.), образующие сенсорную систему робота, которая собирает два вида нужной для системы управления робота информации: о собственном состоянии робота и о состоянии объекта манипулирования и окружающей среды [4]. Однако для того, чтобы роботы могли формулировать задачи и успешно их выполнять в коллективе, они должны быть снабжены не только более совершенными датчиками ощущений, но и обладать способностью понимать язык ощущений и оценивать психические особенности членов коллектива [5].

При создании органов чувств и «центральной нервной системы робота» (ЦНСР) целесообразно применять бионический подход. Во всем мире разрабатываются различные виды этих устройств с использованием такого подхода. Исследуются различные устройства для распознавания образов, искусственные глаза для чтения букв и цифр, искусственные уши для восприятия речи, различные виды тактильных датчиков и другие аналоги органов чувств [6], [7]. Есть надежда, что какая-то часть этих исследований облегчит решение проблемы общения между человеком, вычислительными машинами и другими устройствами. Разумеется, любые из разрабатываемых сейчас устройств, пригодятся впоследствии для использования в роботах. Однако в ЦНСР сенсоры только воспринимают информацию, далее эта информация должна преобразоваться для анализа и выработки ответных реакций.

Создания ЦНСР в настоящее время сводится, прежде всего, к исследованию и разработке цепочек следующего типа: РЕЦЕПТОРЫ (сенсоры, датчики и другие измерительные системы робота)→ НЕРВНАЯ ЦЕПЬ (информационный канал приема сигналов и их первичная обработка) → ЗОНЫ КОРЫ (объединение сигналов, распознавание, классификация, принятие решения)→ ИМПУЛЬС (информационный канал передачи управляющих сигналов, их преобразование и формирование управляющего воздействия) → РЕАКЦИЯ (перемещение, растяжение и другие действия рабочих органов робота) [8]. Задачу построения центральной нервной системы роботов можно разбить на две взаимосвязанные. Первой является создание более совершенных датчиков и технических систем ощущений. Второй – создание программных средств, обеспечивающих роботов способностью понимать язык ощущений и формировать поведенческие процессы на основе анализа ощущений для того, чтобы обеспечивать роботов возможностью рефлексивных рассуждений, приближающих знаковые системы к тем, которыми пользуется в своей повседневной практике человек. Одним из наиболее перспективных вариантов математической реализации второй задачи является логико-математическое описание и формирование поведенческих процессов на основе анализа ощущений в виде сигналов от сенсорной системы робота [9].

Таким образом, в настоящее время изучены и имитируются такие психические процессы человека, как восприятие сенсорной информации и принятие решений. Они используются при создании ЦНСР. Для наделения ЦНСР другими свойствами психики человека, например эмоциям и темпераментом целесообразно проанализировать психические процессы человека. В практической психологии [10] выделяют следующие основные психические процессы у человека: восприятие, внимание, память, мышление, эмоции, темперамент, язык и речь, сознание и самосознание. Эмоции и темперамент, служащие для отражения субъективного отношения человека к самому себе и к окружающему его миру и существенно влияющие на целесообразное поведение в коллективе изучены слабо и пока не применяются в ЦНСР.

Эмоции усиливаются при информационном дефиците и способствуют его преодолению, повышая чувствительность системы восприятия [10]. При этом открываются шлюзы для приема дополнительной информации, которая в свою очередь расширяет возможности мышления, то есть принятия решений роботом.

Внимание выделяет актуальные, личностно-значимые сигналы. Выбор осуществляется из множества всех сигналов, доступных восприятию в данный момент.

Память – это процесс запечатления, сохранения, воспроизведения следов прошлого опыта. Она дает возможность сохранять постоянными тенденции к целесообразному поведению на длительные интервалы времени и в какой-то мере прогнозировать поведение на будущее. У ИР память формируется в виде баз данных и знаний в процессе обучения и самообучения.

Мышление связано с использованием информации о преобразованном в памяти образе восприятия, вызываемом из нее для принятия решения – вторичном образе или представлении. Мышление радикально расширяет возможности человека в его стремлении к познанию всего окружающего мира вплоть до невидимого и непредставляемого, поскольку оно

оперирует не только первичными и вторичными образами, но и понятиями. Этот процесс в ИР связан с формированием понятий и идентификацией образов, которые в настоящее время наименее изучены.

Важной особенностью психических функций человека является то, что их физиологический компонент, то есть те изменения в работе центральной нервной системы, которые обеспечивают соответствующий психический процесс, человеком совершенно не воспринимается. Нейрофизиологические составляющие психических процессов оказываются практически недоступными для самонаблюдения [10], что усложняет процесс заимствования ИР психологии человека.

Дополнение структуры центральной нервной системы робота элементами психики

Наделение интеллектуальных роботов (ИР) психикой, подобной психики человека [11] возможно при формировании его центральной нервной системы. Последнее особенно актуально при формировании поведения коллективов ИР и людей-операторов для выполнения совместных сложных технологических операций. Для наделения ЦНСР элементами психики в предложенной ранее нами структуре [8] блок 4 фаззификации, распознавания и принятия решения требует значительного усложнения функциональных возможностей. В частности, в общем виде структуру блока 4 можно представить в следующем виде (рис. 1).

В блоке 8 должны формироваться образы, с которыми в дальнейшем оперируют внимание (блок 9), память (блок 10), мышление (блок 11), эмоции (блок 12) и темперамент (блок 13).

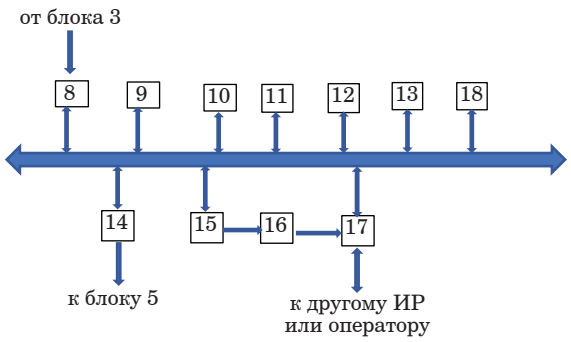


Рис. 1. Структура блока 4 с учетом психики ИР: 8 – восприятие; 9 – внимание; 10 – память, 11 – мышление; 12 – эмоции; 13 – темперамент; 14 – принятие решения; 15 – язык; 16 – речь; 17 – человеко-машинный интерфейс; 18 – супервизор

В зависимости от анализаторов (блоки 1–3 на рис. 1) в блоке 8 используются следующие виды сенсорной информации: зрение, осязание, слух, кинестезию, обоняние, вкус. Благодаря связям, образующимся между разными анализаторами, в формируемых в блоке 8 образах отражаются такие свойства предметов или явлений, для которых нет специальных анализаторов, например, величина предмета, вес, форма, регулярность и его свойства, например, «опасный – не опасный», «живой – не живой», «вкусный – не вкусный», что способствует организации психического процесса в ЦНСР.

Блок 9 должен выделять актуальные, личностно-значимые для решения ИР текущей задачи сигналы. Выбор осуществляется из множества всех сигналов, доступных восприятию (блоку 8) в данный момент. В отличие от восприятия, связанного с переработкой и синтезом информации, поступающей от входов разной модальности, внимание (блок 9) ограничивает лишь ту ее часть, которая будет реально требоваться и обрабатываться, то есть та, которая нужна ИР для принятия решения в конкретной ситуации. Это сокращает объем информации, обрабатываемой в текущей ситуации выбора.

В блоке 10, помимо хранения текущей информации, должен осуществляться процесс запечатления, сохранения, воспроизведения следов прошлого опыта ИР. Это дает возможность сохранять постоянными тенденции к целесообразному поведению ИР на длительные интервалы времени и в какой-то мере прогнозировать поведение на будущее. Указанная информации в памяти ИР (блоке 10) формируется в виде баз данных и знаний в процессе обучения и самообучения.

Процесс мышления ИР (блок 11) связан с формированием понятий и идентификацией образов, которые частично описаны в [26]–[28], но для целей наделения ЦНСР психикой изучены слабо. Последнее пока не позволяет вообще снять границы для ИР воспринимаемого, представляемого и вспоминаемого и преодолеть пространственную ограниченность восприятия.

Блок 12 эмоции должен определять личную значимость для ИР воспринимаемой в блоке 8 информации и оцениваемой в блоках 9 и 11 внешних и внутренних ситуаций для жизнедеятельности ИР. Блок 12 служит для отражения субъективного отношения ИР к самому себе и к окружающему его миру. В отличие от блока 11 блок 12 формирует субъективное отношение

ИР к внешней и внутренней среде, которое усиливается при информационном дефиците и способствует его преодолению, повышая чувствительность системы восприятия. Наделение эмоциями ИР особенно важно при взаимодействии ИР с человеком.

Блок 13 темперамент должен формировать такие особенности психических процессов в ЦНСР, которые влияют на скорость вспоминания и прочность запоминания, беглость мыслительных операций, устойчивость и переключаемость внимания. Он обуславливает тип нервной системы ИР и динамику принятия решений. При взаимодействии ИР с человеком и особенно с коллективом необходимо наделять ИР способностью распознавать темперамент человека и изменять свой (адаптировать) для успешной реализации совместных действий.

Блок 14 принятие решения, взаимодействуя с блоками 10 и 11 должен обеспечивать ИР целесообразным поведением в текущей ситуации.

Блоки 15 язык и 16 речь должны обеспечивать интеллектуальное взаимодействие с другими ИР и человеком через блок 17 человеко-машинный интерфейс. Сложность функционирования этих блоков обуславливается плохой изученностью и слабой формализацией лингвистических особенностей общения людей.

Блок 17 супервизор -это программа или комплекс программ, обеспечивающих взаимодействие всех блоков ЦНСР в многопрограммном режиме работы вычислительной системы.

Заключение

Наделение интеллектуального робота свойствами, аналогичными психическим свойствам человека, является актуальной проблемой, решение которой позволит повысить качество принятия решения по оптимальному управлению поведением интеллектуального робота при выполнении сложных технологических задач в коллективе и в условиях большой неопределенности среды функционирования.

Решение проблемы наделения интеллектуального робота элементами психики человека путем создания математических и программных средств, позволяющих обеспечивать ЦНСР возможностью учета особенностей психики членов коллектива при выборе оптимальных коллективных действий, находиться еще на самой начальной стадии, ограничивающейся моделированием поведенческих процессов на основе анализа ощущений. Тем не менее имеющиеся технические решения на данном этапе позволяют приступить к созданию упрощенных прототипов ЦНСР, наделенных психологией. Одним из наиболее перспективных вариантов ее математической реализации может быть логико-математический подход к реализации формирования поведенческих процессов на основе анализа ощущений в виде сигналов от сенсорной системы робота.

Предложена новая структура центральной нервной системы робота с блоками, позволяющими учитывать психологию членов коллектива для обеспечения оптимального взаимодействия при выполнении совместных технологических операций.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания по контракту № 121112500304-4.

Список источников

1. *Кунц Г., О'Доннел С.* Управление: системный и ситуационный анализ управленческих функций. М.: Прогресс, 2002. 588 с.

2. *Александров О. П., Казахбаева Г. У.* Психология роботов как наука. / Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс».

3. *Карпов В. Э., Карпова И. П., Кулинич А. А.* Социальные сообщества роботов. М.: УРСС, 2019. 352 с.

4. *Хахалин Г. К.* Прикладная онтология на языке гиперграфов // Труды Второй Всероссийской конф. с международным участием «Знания-Онтологии-Теории» (ЗОНТ-09). 20–22 октября 2009 г., Новосибирск, 2009. С. 223–231.

5. *Gorodetskiy A., Kurbanov V.* Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous Systems. / Studies in Systems, Decision and Control 95, Springer International Publishing, Swizarland, 2017. 270 p.

6. *Хахалин Г. К., Курбатов С. С., Найденова К. А.* Интегрирование интеллектуальных систем анализа/синтеза изображений и текста: контуры проекта INTEGRO // Труды Междунар. научно-техн. конф. «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем» OSTIS–2011. 10–12 февраля 2011. Минск, 2011. С. 302–318.

7. *Хахалин Г. К., Курбатов С. С., Литвинович А. В.* Синтез визуальных объектов по естественно-языковому описанию // Труды Второй междунар. научно-техн. конф. «Компьютерные науки и технологии» (КНиТ–2011), 3–7 октября 2011 г., Белгород, 2011. С. 595–600.

8. *Gorodetskiy A., Tarasova I., Kurbanov V.* Challenges Related to Development of Central Nervous

System of a Robot on the Bases of SEMS Modules / Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System. Editor Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Studies in Systems, Decision and Control 95, Springer International Publishing AG, 2017. P. 3–16.

9. *Gorodetskiy A., Tarasova I., Kurbanov V.* Logical-Mathematical Model of Decision Making in Central Nervous System SEMS / Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System. Editor Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Studies in Systems, Decision and Control 95, Springer International Publishing AG, 2017. P. 51–60.

10. *Грановская Р. М.* Элементы практической психологии. 5-е изд., испр. и доп. СПб.: Речь, 2003. 655 с.

11. *Карпов В. Э.* Эмоции и темперамент роботов. Поведенческие аспекты // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. № 5. С. 126–145.

УДК 681.511 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-203-209**

Н. Л. Гречкин*
ассистент
А. В. Амплеева*
студентка
Е. Ю. Ватаева*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СИНТЕЗ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ

Рассматривается синтез корректирующего устройства для системы автоматического управления (САУ) при использовании библиотеки sisotool в прикладном пакете Matlab/Simulink, приводятся результаты моделирования.
Ключевые слова: *синтез, корректирующее устройство, стабилизация скорости.*

N. L. Grechkin*
Assistant
A. V. Ampleeva*
Student
E. Y. Vataeva*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

SYNTHESIS OF A CORRECTIVE DEVICE FOR A SPEED STABILIZATION SYSTEM

The paper considers the synthesis of a corrective device for an automatic control system (ACS) using the sisotool library in the Matlab/Simulink application package. The simulation results are given.
Keywords: *synthesis, corrective device, speed stabilization.*

Основной задачей теории автоматического управления является синтез систем автоматического управления (САУ). Довольно часто для достижения, желаемого качества системы достаточно настроить параметры САУ. Если же этого оказалось недостаточно, то тогда необходимо вносить изменения в структуру САУ, а именно синтезировать корректирующее устройство.

Control System Designer позволяет проектировать корректирующее устройство для систем с одним входом и одним выходом (single-input, single-output, SISO) с обратной связью [1], [2].

При помощи Control System Designer можно графически настраивать коэффициенты усиления и динамические свойства компенсатора и предфильтра, используя:

– интерактивные графические редакторы АЧХ и ФЧХ, корневого годографа и частотного отклика (графика Никольса) для добавления, изменения и удаления нулей и полюсов корректирующего устройства и коэффициентов усиления;

– автоматическую настройку ПИД-регулятора, линейно-квадратичное гауссовское управление (linear-quadratic-Gaussian (LQG)) или внутреннее управление моделью (Internal Model Control (IMC)), настройку на основе оптимизации.

Рассмотрим двигатель независимого (параллельного) возбуждения с управлением за счет изменения напряжения на якоре [3], [4]. Его передаточная функция представляет собой колебательное звено вида

$$W(p) = \frac{w(p)}{U(p)} = \frac{k_{ИМ}}{T_Э T_M p^2 + T_M p + 1}.$$

Требуется синтезировать корректирующее устройство для системы стабилизации скорости вращения вала двигателя постоянного тока, обеспечивающее следующие показатели качества переходного процесса: 681

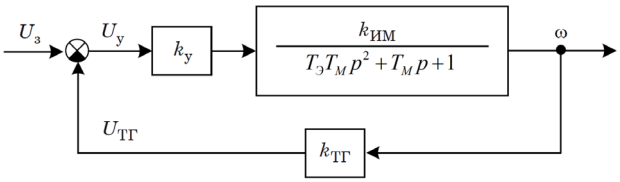


Рис. 1. Структурная схема стабилизации скорости вращения

– установившееся значение скорости вращения вала – 157,08 рад/с,

– перерегулирование не больше 10 %,

– установившая ошибка – 1 %,

– время переходного процесса не больше 0,2 сек.

Для запуска средства Control System Designer вводим команду SISOTOOL в командном окне MatLAB.

Прежде чем начинать проектирование регулятора, необходимо внести информацию о модели: параметры неизменяемой части схемы и закон управления. Следует отметить, что SISOTOOL оперирует со всеми видами моделей линейных стационарных элементов с одним входом и одним выходом (LTI-моделей), такими как tf, zpk и ss.

Итак, задаем передаточную функцию и прочие коэффициенты системы:

```
kim=0.7854; % коэффициент исполнительного механизма
ku=20; % коэффициент усиления
Te=0.0090; % электромагнитная постоянная времени
Tm=0.0158; % электромеханическая постоянная времени
W=tf([kim*ku],[Te*Tm Tm 1]);
ktg=0.046; % коэффициент тахогенератора
Uz=7.2256; % задающее напряжение
controlSystemDesigner('bode',W);
```

Для структуры, представленной на рис. 2, задаются следующие значения блоков:

Компенсатор C по умолчанию равен 1, объект управления *G=W*, датчик *H=ktg*, предфильтр *F=Uz*.

Блоки *G* и *H* образуют неизменяемую часть проектируемой системы, *C* и *F* регулируются графически, а также автоматической настройкой.

Одним из способов изменения системы является диаграмма Боде разомкнутого контура. Можно использовать меню правой кнопки и характеристики интерактивных графиков, чтобы добавлять, изменять и удалять нули и полюса. С помощью диаграммы Боде можно задать запасы устойчивости по амплитуде и фазе, время переходного процесса, перерегулирование, настроить полосу пропускания и добавить режекторный фильтр для снижения помех.

Самым простым способом уменьшения времени переходного процесса является увеличение коэффициента усиления компенсатора. Для этого необходимо навести курсор мыши на график и, удерживая левую кнопку мыши, передвинуть его вверх.

Кроме того, можно добавлять нули и полюса в систему:

– действительный полюс,

– пара комплексно-сопряженных полюсов,

– интегратор,

– действительный ноль,

– пара комплексно-сопряженных нулей,

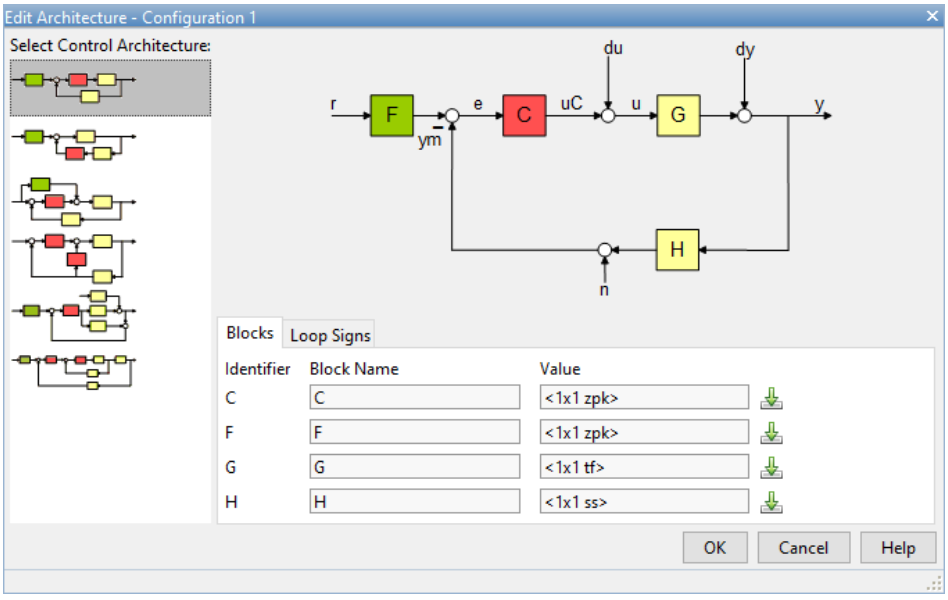


Рис. 2. Структура системы управления с корректирующим устройством

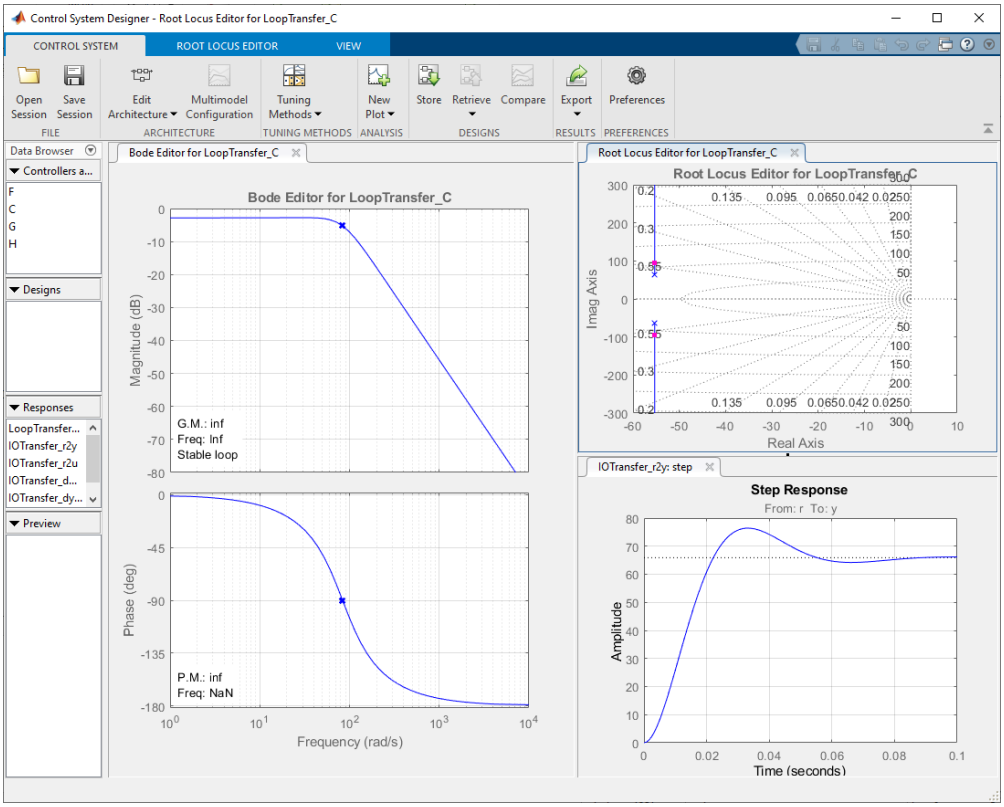


Рис. 3. Характеристики нескорректированной системы

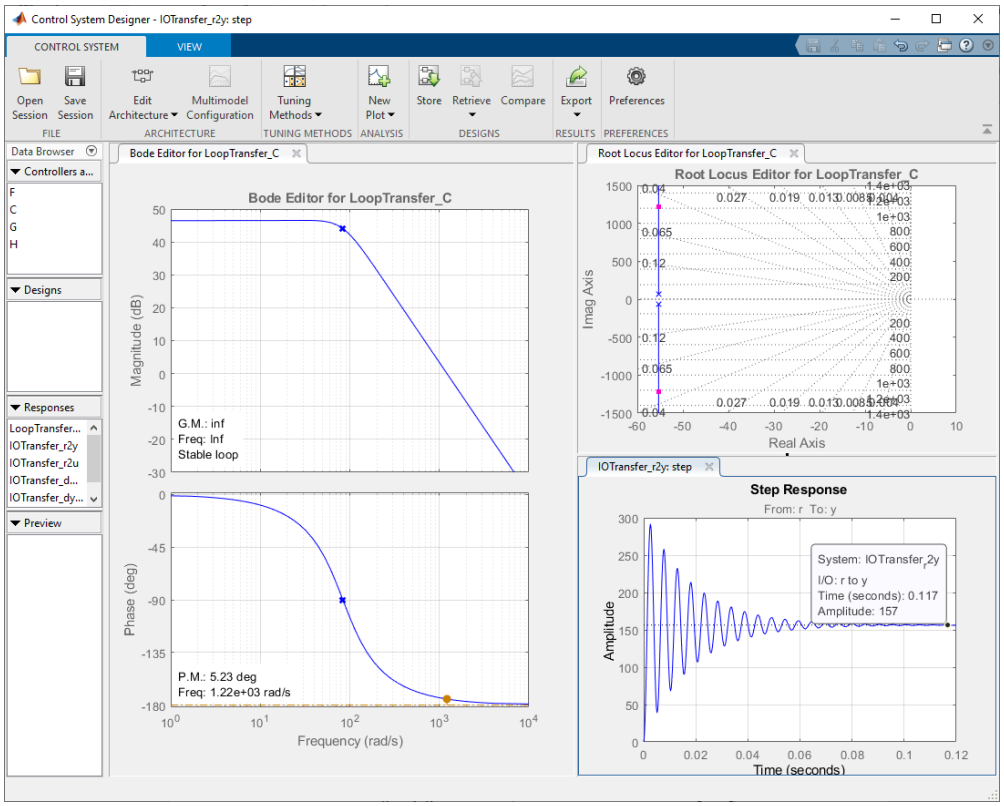


Рис. 4. Настройка корректирующего устройства

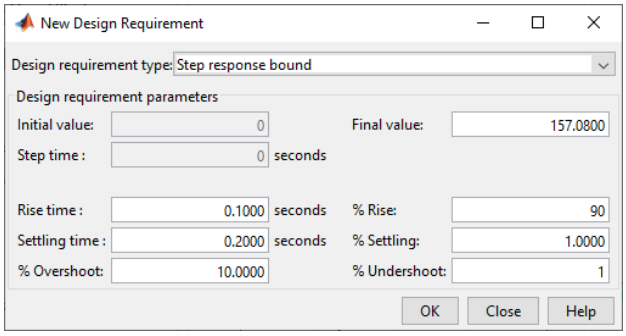


Рис. 5. Ограничения системы

– дифференциатор,
– Lead (предварение),
– Lag (запаздывание),
– Notch (режекция).

Поскольку требуемое установившееся значение скорости должно быть больше имеющегося, необходимо поднять АЧХ, в результате скорость в 157 рад/с устанавливается при амплитуде в 47 дБ (рис. 4). Однако получившая система имеет излишнюю колебательность и большое перерегулирование. Добавив действительный полюс на частоте около 0,1 рад/с, получим систему, удовлетворяющую требованиям (рис. 6). По умолчанию в нижнем левом углу окна графика Боде показываются запасы устойчивости по амплитуде и фазе, а также информация об устойчивости замкнутого контура системы. Таким образом, запас устойчивости системы по амплитуде составит 11,5 дБ, по фазе – 62 градуса.

Для добавления ограничений можно выбрать в меню правой кнопки пункт Design Requirements>New, здесь же доступно их редактирование в пункте Edit (рис. 5). Ограничения можно установить отдельно для каждой из характеристик.

Панель Compensator Editor (рис. 7) показывает структуру проектируемого регулятора. На панели отображаются все изменения, происходящие в зависимости от перетягивания графиков и добавления/удаления нулей и полюсов. Здесь же можно задать точные значения коэффициента усиления и нулей/полюсов.

Аналогично можно настроить регулятор, используя график расположения корней. В окне Root Locus Editor. Также можно перемещать и добавлять нули и полюса на корневом годографе.

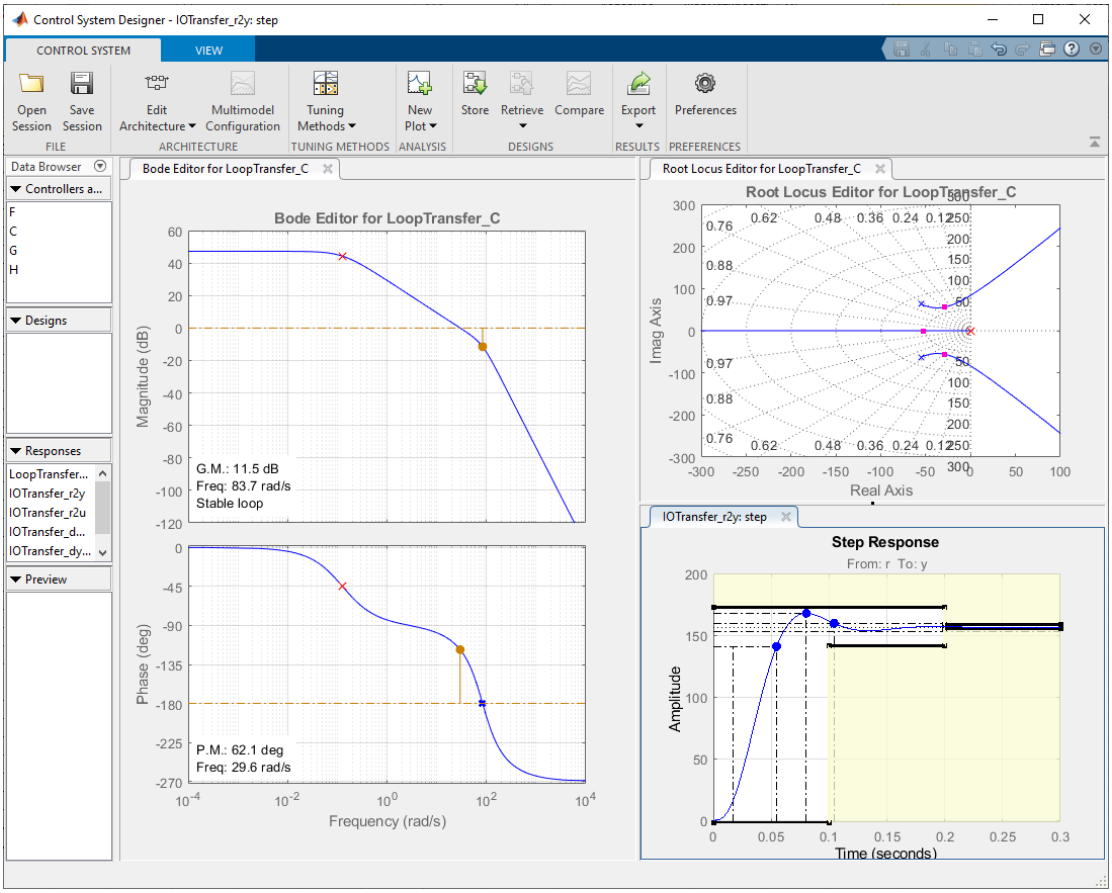


Рис. 6. Результат настройки корректирующего устройства

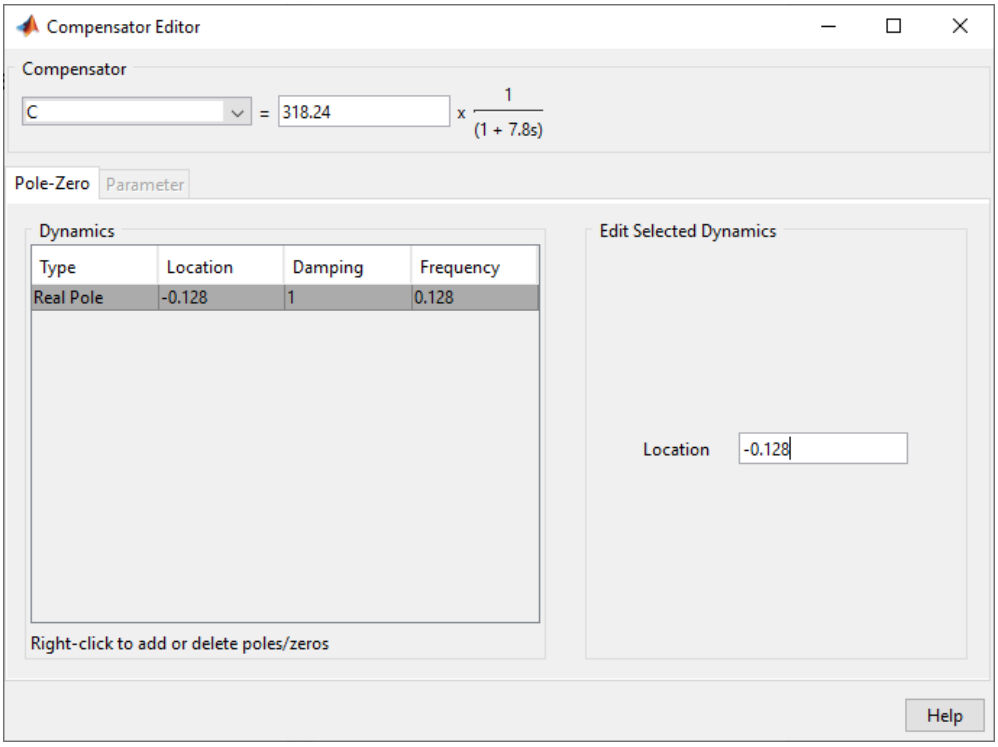


Рис. 7. Параметры полученного корректирующего устройства

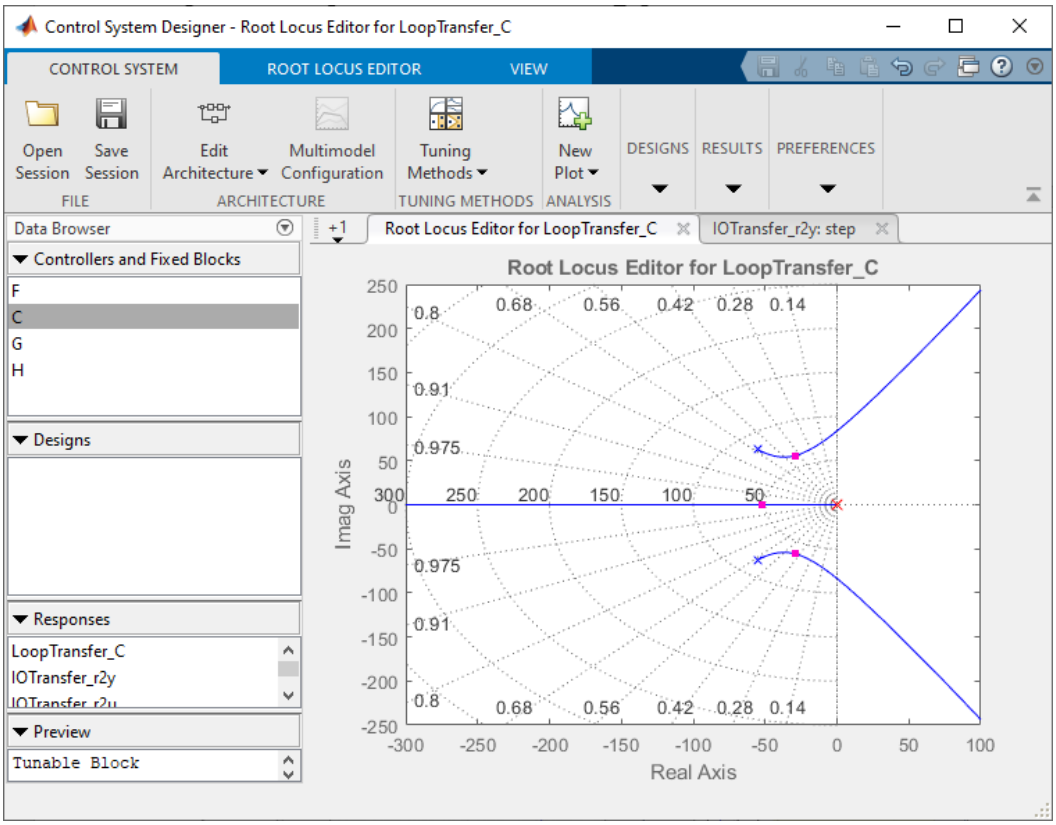


Рис. 8. Настройка регулятора при помощи корневого годографа

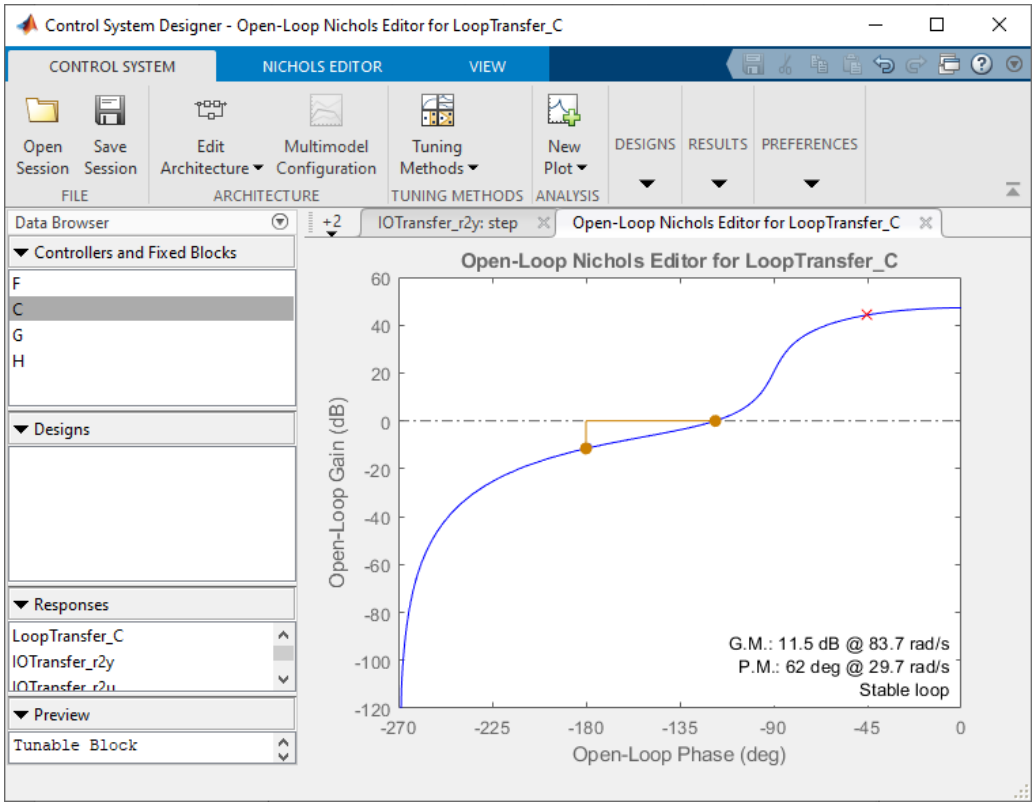


Рис. 9. Настройка регулятора при помощи графика Никольса

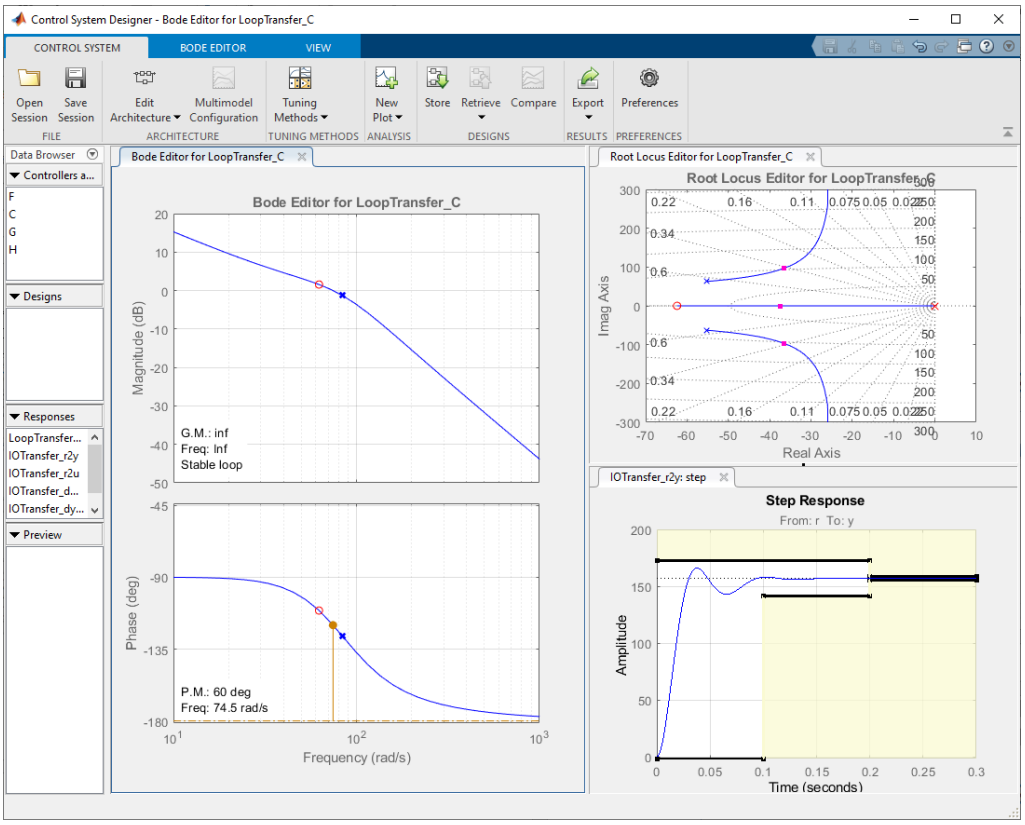


Рис. 10. Результат автоматической настройки регулятора

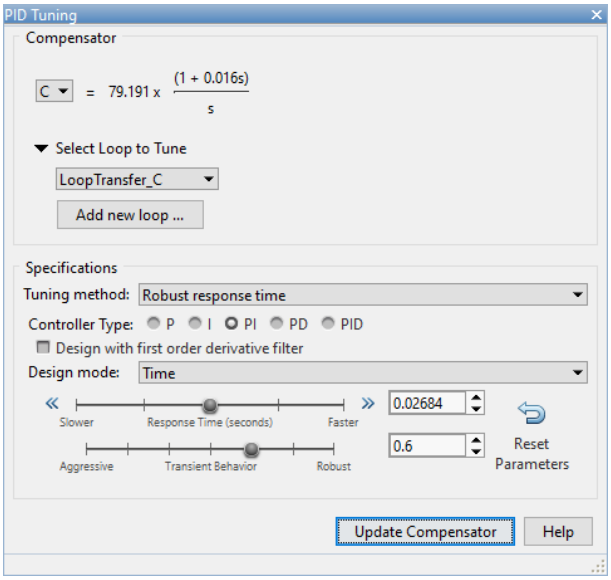


Рис. 11. Параметры ПИ-регулятора, полученного автоматически

Альтернативным методом проектирования компенсатора является расчет по графику Никольса разомкнутого контура. Здесь желтыми прямыми показаны запасы устойчивости по амплитуде и фазе.

Для графика Никольса разомкнутого контура можно задать следующие виды ограничений:

– Phase Margin (запас устойчивости по фазе);

– Gain Margin (запас устойчивости по амплитуде);

– Closed-Loop Peak Gain (максимальный коэффициент усиления замкнутого контура).

При задании любых из вышеперечисленных ограничений на графике Никольса появляются линии или кривые. Чтобы задать ограничения, необходимо ввести их значение в панели Constraint Parameters. Можно задать любое ограничение ил несколько ограничений одного типа.

Помимо графической настройки регулятора, Control System Designer позволяет подбирать параметры компенсатора автоматически, например, с использованием ПИД-регулятора (рис. 10, 11).

Поскольку проектирование корректирующего устройства обычно является итерационным процессом, зачастую требуется повторное рисование характеристик системы, что может отнимать много времени. *Control System Designer* решает эту проблему, причем подбор параметров регулятора становится довольно наглядным, обеспечивается динамическая связь между параметрами проектируемой системы и ее характеристиками, отображаемыми в окне интерфейса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Список источников

1. *Бурьков Д. В.* Mathcad, Matlab, Matlab Simulink, Scilab в электротехнике: учеб. пособие. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2021. 171 с.

2. *Дьяконов В. П.* MATLAB 7.*/R2006/R2007: Самоучитель: самоучитель / В. П. Дьяконов. М.: ДМК Пресс, 2009. 768 с.

3. Электрический привод: учеб. пособие / М. Б. Фомин, В. Г. Петько, И. А. Рахимжанова и др. Оренбург: Оренбургский ГАУ, 2020. 180 с.

4. *Негадаев В. А.* Электрический привод: учеб. пособие / В. А. Негадаев. Кемерово: КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2019. 132 с.

УДК 62.53 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-210-214**

С. О. Жеребко*
студент
Ю. А. Ганьшин*
кандидат технических наук, доцент
К. А. Ившин**
старший научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
***Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»*

МЕТОД КОНТРОЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ ЧИСТОТЫ ГАЗА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ MUSUN

Описан анализ химической чистоты газа на установке MuSun, задача которого является измерение скорости захвата отрицательного мюона ядром дейтерия из дублетного состояния dμ-мезоатома, при работе криогенной время-проекционной камеры.
Ключевые слова: *химическая чистота, криогенная время-проекционная камера, MuSun, хроматограмм.*

S. O. Zherebko*
Student
Y. A. Ganshin*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
K. A. Ivshin**
Senior Researcher, Research Center «Kurchatov Institute» – PNPI
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
***St. Petersburg Institute of Nuclear Physics named after B. P. Konstantinov National Research Center «Kurchatov Institute»*

METHOD OF CONTROL OF CHEMICAL PURITY OF GAS IN THE MUSUN EXPERIMENT

The analysis of the chemical purity of the gas at the MuSun experiment is described, the task of which is to measure the rate of capture of negative muon by the deuterium nucleus from the doublet state of the d–mesoatom, during the operation of a cryogenic time-projection chamber.
Keywords: *chemical purity, cryogenic time-projection chamber, MuSun, chromatograms.*

Имеют популярность и распространены в ядерной физике исследования, в чьих методах используются столкновение пучков частиц с неподвижной мишенью. Существует три вида неподвижных мишеней: твердотельные, газовые, и жидкие. Разница зависит от поставленной в эксперименте задачи. Изменения, выделенные продукты, результаты эксперимента фиксируются и регистрируются внешними датчиками-детекторами. Также существует иной метод исследования с «активной мишенью». Активными мишенями называются устройства, в которых ядра рабочего тела прибора являются объектом исследования взаимодействия с микрочастицами, или же пучками. Также считаются их особенными преимуществами тот факт, что при методе их использования, учитываются функции рабочего объекта исследования пучка и непосредственно детектора результатов это воздействия.

Основная физическая задача эксперимента MuSun – измерение скорости захвата отрицательного мюона ядром дейтерия из дублетного состояния dμ-мезоатома.

Используется метод исследования и измерения времени существования в дейтерии положительного и отрицательного мюона относительно друг друга. Было замечено и проанализировано наблюдение совпадение времени существования положительного мюона как в дейтерии, так и в вакууме. Это происходит из-за того, что между положительным мюоном и дейтроном нет свя-

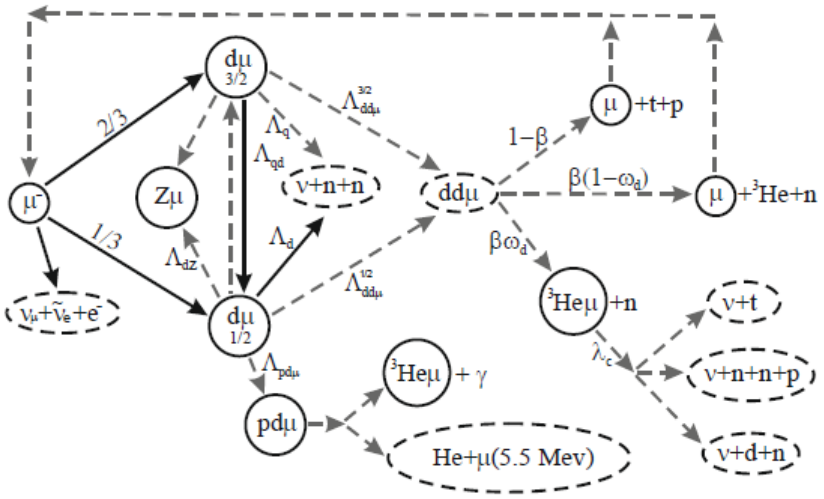


Рис. 1. Кинетическая схема взаимодействия мюона с дейтроном. Сплошной линией выделен изучаемый канал реакции

занного состояния. Можно сделать вывод и получить совпадение времени жизни отрицательного и положительного мюона из-за той причины, что являются античастицей и частицей. Это все следует из CPT-теоремы [1].

Из-за полученной реакции отрицательных мюонов с дейтерии, выряжается отличие времен существования положительного и отрицательного мюона.

MuSun имеет больше по количеству процессов к наблюдаемому каналу реакции, чем исследование MuCap, где данных процессов меньше, и исследовался только захват мюона частицей протона, что затрудняет исследование по методу времени существования мюона.

На рис. 1 представлена кинетическая схема взаимодействия отрицательного мюона с дейтроном. Изучаемый канал реакции выделен сплошной линией.

Кроме исследуемого канала реакции есть сопутствующие, которые должны быть подавлены, либо их влияние должно быть учтено при дальнейшей обработке результатов эксперимента. К таким каналам реакции относятся:

– Λq – канал реакции распада dμ-атома из квартетного спинового состояния S=3/2;

– Λddμ – канал реакции образования ddμ-молекулы, с последующим d-синтезом;

– Λdz – канал реакции перехвата мюона на примеси с зарядовым числом Z > 1 такой как азот или кислород;

– Λpdμ – канал образования pdμ-молекулы с последующим синтезом.

Данные каналы реакций, и другие факторы, стали причиной создания экспериментальной установки. Помимо главной особенности, а именно комплекса подсистем, в чьи функции входят термодинамические параметры и чистота рабочего газа, в состав установки входят криогенная время – проекционная камера CryoTPC и окружающей ее система вспомогательных детекторов. В комплекс подсистем включает в себя такие системы как, система охлаждения, а также хроматографическая установка для

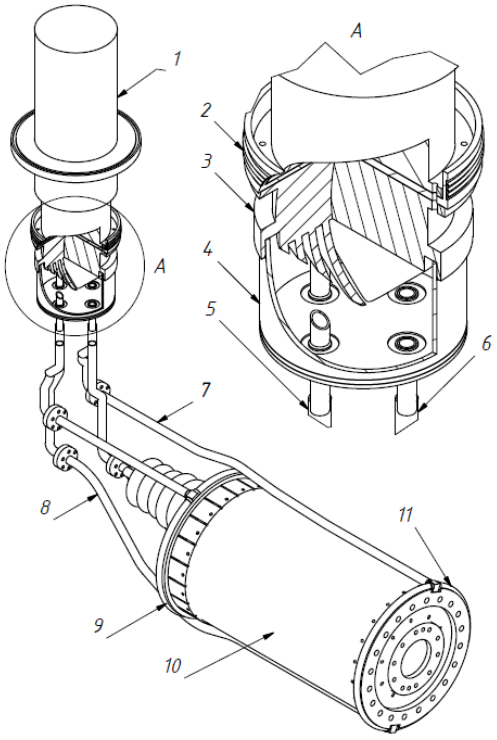


Рис. 2. Система охлаждения TPC: 1 – головка криогенератора; 2 – нагреватель; 3 – тепловой мост; 4 – обечайка конденсатора; 5 – возвратная трубка; 6 – подающая трубка; 7 – возвратный сильфон; 8 – подающий сильфон; 9 – 11 – теплообменники; 10 – CryoTPC

контроля системы химической очистки и чистоты рабочего газа [2]–[4].

Внешний вид системы охлаждения CryoTPC представлен на рис. 2

К криогенной головке крепится биметаллический конденсаторный блок. Большая крышка конденсатора изготовлена из меди, а под ней находится пластина радиатора, состоящая из ряда вертикальных ребер для сжижения охлаждающих газов. Корпус и дно конденсатора изготовлены из нержавеющей стали. К днищу конденсатора с помощью стальных переходников приварены четыре вертикальные медные трубы с внутренним диаметром 10 мм (2 подачи и 2 обработки). Трубки заканчиваются горизонтальными сильфонами и попарно соединяются с медными трубками теплообменника на концах CryoTPC. Виброизоляция головок криогенератора и CryoTPC требует использования гибких сильфонов.

Эксперимент MuSun согласует требованиям исследования по поводу главного фактора, а именно чистоты газа, что не только изучает, но и определяет ценность полученных в исследовании данных. В такие требования входит, то что чистота газа должна поддерживаться на уровне 1 ppb (ppb – частейнамиллиард, 10-9). При таком условии чистоты газа, точность должна быть примерно 0,5 ppb. Это связано с реакцией, из которой следует к параллельному реакционному каналу. Это происходит из-за захвата электроотрицательных примесных мюонов с суммой зарядов $Z > 1$. Итогом становится неопределенность в моменте захвата мюонов и его скорости, которая измеряется и анализируется дейтроном [5].

В таких случаях важно учитывать предельные границы чувствительности и точности иных, других методов анализа химической чистоты. Ведь помимо такой задачи как очистка

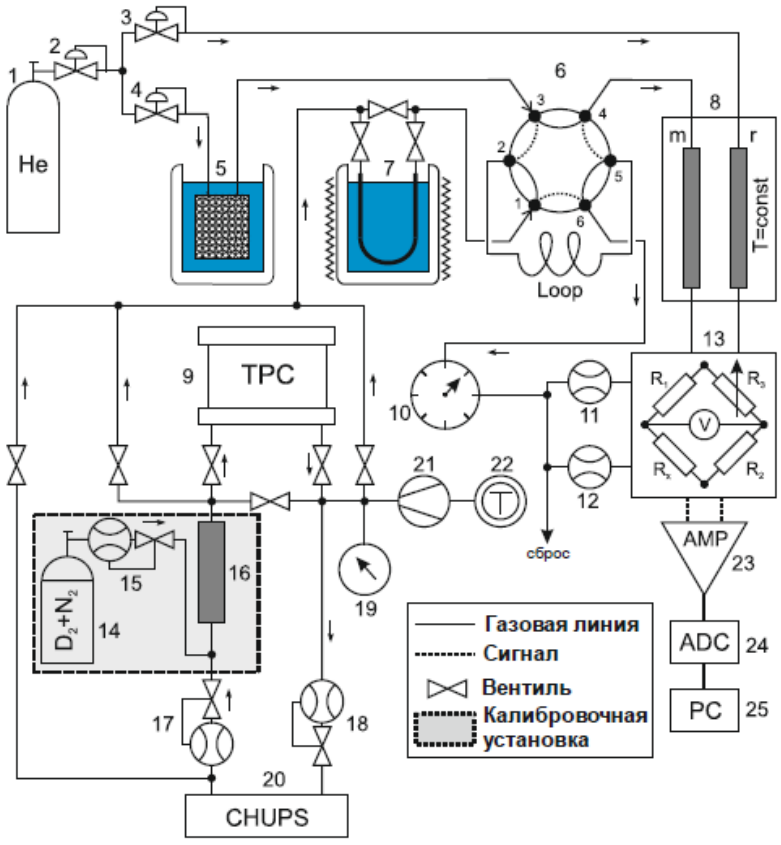


Рис. 3. Упрощенная схема хроматографической установки: 1 – баллон с газом-носителем; 2 – редуктор высокого давления; 3, 4 – точные регуляторы давления; 5 – криогенный очиститель газа-носителя; 6 – многоходовой ручной кран-дозатор; 7 – накопительная колонка; 8 – термостат с основной и измерительными колонками; 9 – CryoTPC; 10 – барабанный газосчетчик; 11, 12 – выходные измерители расхода; 13 – детектор теплопроводности; 14, 15, 16 – калибровочная система: баллон с калибровочной смесью, контроллер массового расхода газа и газосмеситель; 17, 18 – контроллеры массового расхода газа циркуляционной системы; 19 – вакуумный датчик; 20 – циркуляционная система; 21 – высоковакуумный насос; 22 – форвакуумный насос; 23 – усилитель; 24 – аналого-цифровой преобразователь; 25 – компьютер

рабочего газа, стоит более сложная задача в рамках эксперимента MuSun, а именно анализ химической чистоты газов на уровне 1 ppb. Ведь после решения этой задачи появляется возможность в оценке и наблюдении изменения внутреннего состава рабочего газа. К сожалению, исключается возможность определения и регистрации концентрации примесей внутри газа в абсолютных, без погрешностей значениях [6].

Имея единственную надежную альтернативу химическому анализу, можно масштабировать абсолютное разрешение до физических данных, предоставляя уникальную возможность анализировать чистоту рабочих газов CryoTPC на месте.

Метод агломерации в адсорбционной колонне, охлаждаемой жидким азотом, стал в качестве метода концентрирования примеси. Из-за простоты, надежности, и положительной работы его применения в эксперименте MuCap, был сделан данный выбор.

Главной особенностью и основой аналитической части установки стал модернизированный хроматограф, с измененной электронной базой, с использованием газовых компонентов и современных материалов.

Схема установки для хроматографического анализа водорода и дейтерия на микропримеси приведена на рис. 3. Метод использует накапливание примеси из пробы газа в колонке, заполненной цеолитом, при температуре жидкого азота.

Только из криогенной время-проекционной камеры берутся пробные образцы через полированную капиллярную трубку из нержавеющей стали. Это устраняет возможность влияния на процесс сосуда-пробоотборника. Таким образом, воздействие загрязнения сводится к минимуму за счет промывки линии отбора максимально возможным количеством чистого газа.

Была осуществлена существенное улучшение и модернизация электронной части детектора теплопроводности ради повышения точности чувствительности. Изменения коснулась как цифровую часть устройства, которая отвечает за преобразование усиленного сигнала и его передачу для обработки персональному компьютеру, так и аналоговой части, отвечающей за запись и усиление сигнала измерительного моста. Также был изобретен комплекс программ и систем для измерения сигнала детектора теплопроводности. Также важной частью детектора, что является отдельной частью, не включающийся в аналоговую и цифровую систему устройства, является микроконтроллер.

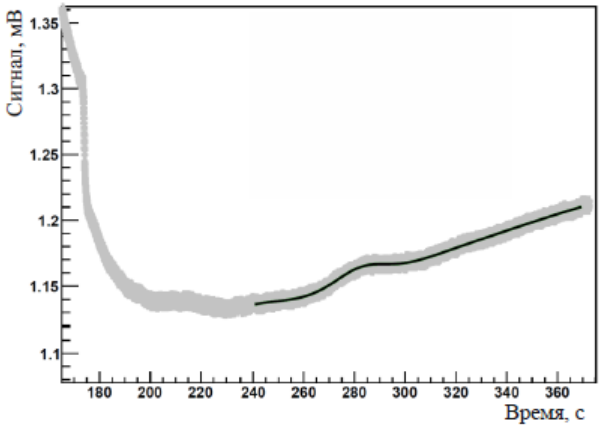


Рис. 4. Хроматограмма измерения химической примеси. Выделенный участок соответствует обрабатываемой части хроматограммы. Сигнал в выделенной части соответствует концентрации ~1.6 ppb

Основной задачей данного блока стало аналого-цифровое преобразование [7].

Для решения задачи в получении и анализе обработанного сигнала и результатов хроматограмма, создано в разработке программа специального назначения, что входит в состав модуля микроконтроллера, подключенного к компьютеру.

Пример работы программы, определяющей измерения во внутреннем составе рабочего газа количества примесей приведен на рис. 4.

Программа обеспечивает визуализацию хроматограмм по всем четырем каналам и интегрирование пиков.

Результатами экспериментальной работы стала система охлаждения CryoTPC. Благодаря данной системе была получена возможность стабильной работы при устойчивой, постоянной температуры в 140 градусах по Кельвину. Данное преимущество дает преимущество в понижении теплопритока и повышении разрешения, полученного для обработки сигнала, до 10 кэВ. При таких положительных условиях, была обеспечена непрерывная работа, в процессе которой насчитывается 1010 остановок мюонов в дейтерии, а это примерно полугода времени долговременного процесса.

Также в число результатов считается достижение достаточного уровня чистоты рабочего газа, при большом, непрерывном потоке этого самого газа. Таким результатом считается, если учитывать условия нормального пересчета, 0.6 ppb при потоке 5 л/мин. Это стало возможно благодаря изобретению и разработке системы очистки газа, особенностью которой стала криогенность, и циркуляция.

Список источников

1. *Griffiths D.* Introduction to Elementary particles, Weinheim: 2004 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1987.

2. *Balin D.* High Precision Study of Muon Catalyzed Fusion in D2 and HD Gases. PNPI preprint 2729, 2007.

3. *Schellenberg L.* Muon Transfer in Gas Mixtures with Hydrogen // Muon Catalyzed Fusion. 1990. Vol. 5. N 1–4. P. 73–85.

4. *Werthmuller A.* Energy Dependence of the Charge Exchange Reaction from Muonic Hydrogen to Oxyge. Hyp. Int. 1998. Vol. 116. N 1–4. P. 1–16.

5. *Ahmed S., Lee S., Papadias D.* Analysis of trace impurities in hydrogen: Enrichment // International Journal of Hydrogen Energy. 2010. P. 35:12480–12490.

6. *Li X.* Determination of trace amounts of permanent gases in ultra pure hydro-gen by gas chromatography // Fresenius Z. Anal. 1988. P. 520–524.

7. *Ившин К. А., Кравцов П. А., Трофимов В. А.* Программно-аппаратный комплекс хроматографического детектора теплопроводности для эксперимента MuSun // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 11. P. 1088–1091.

УДК 62-503.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-215-220**

Ю. М. Замурагин*
аспирант, младший научный сотрудник
К. Б. Саламандра*
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник
Б. Л. Саламандра*
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
**Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН)*

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СБОРКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЛЕНТОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Проведен анализ влияния параметров адаптивной мехатронной системы на процесс стабилизации шага перемещения ленточных материалов при автоматической сборке. Получены зависимости дисперсий и математических ожиданий шага перемещения в зависимости от параметров системы при случайном внешнем воздействии. Проведено численное моделирование работы используемых алгоритмов и даны рекомендации для рационального выбора параметров системы.
Ключевые слова: *автоматическая сборка, алгоритм управления, следящая измерительная система, упаковочная машина, сервопривод, мехатронная система.*

Y. M. Zamuragin*
PhD Student, Junior Researcher
K. B. Salamandra*
Dr. Sc. Tech., Leading Researcher
K. B. Salamandra*
PhD Sc. Tech., Leading Researcher
**Mechanical Engineering Research Institute of the Russian academy of sciences (IMASH RAN)*

MECHATRONIC SYSTEM PARAMETERS FOR AUTOMATIC ASSEMBLY OF PRODUCTS FROM TAPE MATERIALS CHOICE SUBSTANTIATION

The paper analyzes the influence of the adaptive mechatronic system parameters on the process of stabilizing the step of moving materials during automatic assembly. Dependences of variances and mathematical expectations of the displacement step are obtained depending on the parameters of the system under a random external action. Numerical simulation of the operation of the algorithms used is carried out, recommendations are given for the optimal choice of system parameters.
Keywords: *automatic assembly, control algorithm, tracking measuring system, packaging machine, servo drive, mechatronic system.*

Введение

Задача автоматической сборки изделий из различных материалов актуальна для многих видов машин и оборудования, в частности, для автоматических линий (АЛ) для упаковывания пищевых продуктов. На рис. 1 представлена схема операций, выполняемых на подобной АЛ [1]. Здесь компонентами сборки являются нижняя и верхняя ленты упаковочных материалов, сматываемые с рулонов 1 и 2. В нижней полимерной ленте после предварительного нагревания производится формование контейнеров с последующим наполнением контейнеров продуктом. Верхняя лента представляет собой ленту фольги или полимерной пленки с напечатанными с заданным шагом этикетками и метками. Ленты склеиваются в устройстве 6, готовая продукция вырезается из лент в устройстве 7 и сходит с АЛ.

При сборке компонентов, размещенных на двух ленточных носителях, основным требованием является совпадение этикеток, напечатанных на верхней ленте и контейнеров, отформованных в нижней ленте. Перемещение обеих лент осуществляется одним приводом, расположенным между станцией склейки 6 и вырубки 7. Ввиду ряда погрешностей шаг печати этике-

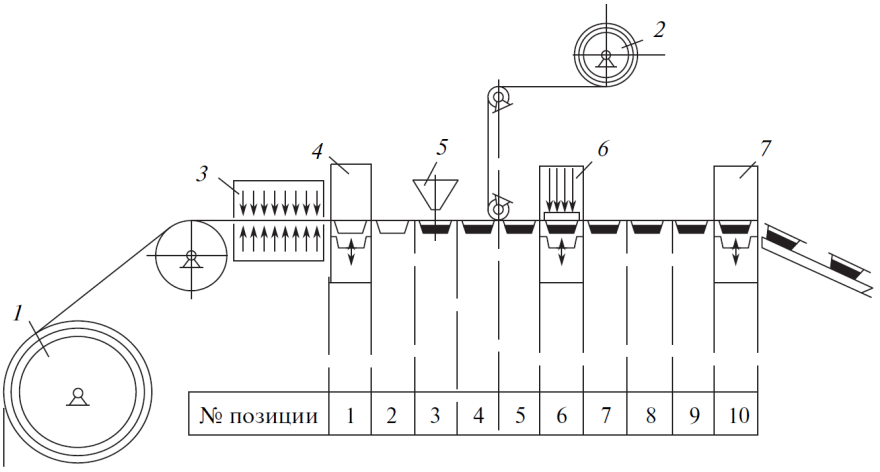


Рис. 1. Технологическая схема автоматической линии

ток не может совпадать с расстоянием между контейнерами, что при работе АЛ приводит к смещению верхней ленты относительно нижней. Известны различные способы синхронизации положения лент [1]–[6], базирующиеся либо на пластической деформации верхней ленты, либо на периодическом изменении шага подачи нижней ленты на определенную величину коррекции. Недостатком этих методов является отсутствие адаптивности системы перемещения лент, т. е. автоматической подстройки при изменении производителя материалов или дизайна этикетки, что зачастую приводит к необходимости дополнительной наладки АЛ.

В ИМАШ РАН разработана адаптивная мехатронная система перемещения лент и синхронизации их положений [7]. Она представляет собой измерительную систему и состоит из сервопривода и модуля линейного перемещения, датчика угла поворота вала сервопривода (энкодера), фотоэлектрического датчика, считывающего этикетки на покровном материале, и системы управления. При перемещении лент этикетка проходит под фотоэлектрическим датчиком, и система управления фиксирует ее положение по показаниям энкодера. Для работы мехатронной системы перемещения лент разработаны несколько управляющих алгоритмов.

Постановка задачи

Созданная мехатронная система перемещения лент, во-первых, должна удерживать шаг перемещения лент в узких пределах для попадания контейнеров, размещенных в нижней ленте, в окна устройств склейки и вырубки. Во-вторых, необходимо обеспечивать заданное положение верхней ленты относительно нижней, то есть требуемое положение этикетки относительно контура контейнера. Таким образом, задача настоящей работы заключается в определении оптимальных значений параметров созданной мехатронной системы, обеспечивающих стабилизацию относительных положений лент материалов и постоянство шага перемещения.

Математическая модель

Величина перемещения лент корректируется на каждом цикле работы АЛ и является средним арифметическим обновляемого массива **S** длиной n. Каждый член массива S представляет собой величину перемещения лент с учетом необходимой коррекции, рассчитанный на соответствующем цикле перемещения лент. Массив предназначен для недопущения существенного изменения величины перемещения и сглаживания *влияния погрешностей измерений*.

$$\mathbf{S}^i = \left[S_i \quad \ldots \quad S_{i-j} \quad \ldots \quad S_{i-(n-1)} \right],\ j = \overline{0,n-1}. \qquad (1)$$

Разработано несколько алгоритмов управления мехатронной системой, два из которых описываются ниже.

Первый алгоритм работает с двумя метками, расстояние между которыми близко по величине расстоянию между контейнерами. Производится измерение расстояния L между двумя соседними метками (рис. 2) и запись его удвоенного значения в массив **S**. С учетом случайных значений погрешности δ, получено следующее выражение

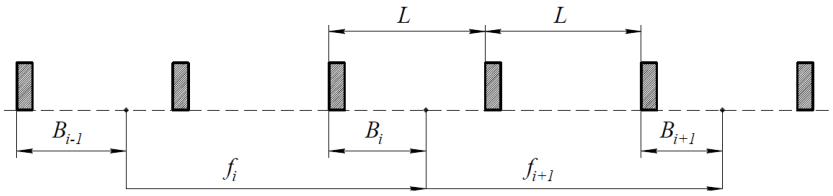


Рис. 2. Схема расположения фотометок

$$\mathbf{S}^{i+1} = \left[S_{i+1} \quad \dots \quad S_{i+1-j} \quad \dots \quad S_{i-n+2} \right],$$
$$S_{i+1} = 2\left(L + \delta_{1,i} + \delta_{2,i}\right). \qquad (2)$$

Значение перемещения f рассчитывается как среднее значение массива в соответствии с формулой

$$f_i = \overline{\mathbf{S}}^i = \frac{1}{n}\sum_{j=0}^{n-1} S_{i-j}. \qquad (3)$$

Второй алгоритм в свою очередь рассчитывает перемещение f по разности абсолютных координат B переднего фронта метки на соседних шагах (рис. 2)

$$S_{i+1} = f_i - \Delta_{i-1}, \quad \Delta_i = B_i + \delta_i - \left(B_{i-1} + \delta_{i-1}\right). \qquad (4)$$

Для того чтобы обеспечить заданное положение верхней ленты относительно нижней, дополнительно разработан алгоритм коррекции абсолютного положения этикетки относительно контура контейнера. Для этого введен счетчик M, максимальное значение которого соответствует длине m производственного цикла изделия (расстояние между станциями формовки и вырубки на рис. 1). Счетчик используется для того, чтобы не допустить введение нескольких коррекций на абсолютное положение пока не закончится один производственный цикл. На каждом перемещении лент вычисляется текущее значение смещения этикетки $\Delta_i^{\Sigma}=B_i - B_0$, показывающее на сколько в данный момент времени смещена этикетка относительно контура контейнера. Необходимо задать значения предельного отклонения положения этикетки относительно контура контейнеров $[\Delta]$ (обычно 1 мм) и желаемое положение этикетки B_0 (определяется расположением фотоэлектрического датчика относительно рисунка этикетки). В зависимости от смещения этикетки система управления реализует шаг f_i+k или f_i-k.

В качестве математической модели используются соотношения, полученные ранее для обоих алгоритмов [7]. Пользуясь правилом обновления массива (2) и формулой вычисления перемещения f (3) можно найти математическое ожидание и дисперсию перемещения f каретки при использовании первого алгоритма. Примем, что погрешность измерения δ является случайной величиной, подчиняющейся нормальному распределению, имеющему математическое ожидание $M[\delta]=0$ и дисперсию $D[\delta]=\sigma^2$ [8]. В таком случае не составит труда вычислить математическое ожидание и дисперсию перемещения f каретки [8]

$$M[f] = 2L;\ D[f] = \frac{8}{n}\sigma^2. \qquad (5)$$

Полученный результат говорит о том, что при увеличении длины массива n, дисперсия перемещения каретки f будет уменьшаться. Важно отметить, что использовать массив длиной $n \le 8$ не имеет смысла, так как в этом случае дисперсия f не будет меньше дисперсии δ.

Смещение этикетки относительно контура контейнера в математической модели может быть вычислено следующим образом

$$\Delta_i^{\Sigma} = \sum_{j=1}^{i}\left(f_j - A\right) = \sum_{j=1}^{i}\Delta_j.$$

На рис. 3 показана реализация работы алгоритма 1 для нескольких значений n при параметрах системы (6). Из рис. 3*а* видно, что с увеличением длины массива n, увеличивается число шагов, за которое система находит действительный шаг печати L. Это приводит и к тому, что с увеличением n увеличивается суммарное смещение этикетки относительно контура контейнера Δ^{Σ} (рис. 3*б*). Полученный результат говорит о том, что увеличивать длину массива n до бесконечности также нельзя

$$n = \left[8, 10, 12\right],\ L = 50,$$
$$\mathbf{S}^0 = \left[101 \quad \dots \quad 101 \quad \dots \quad 101\right], \qquad (6)$$
$$M[\delta] = 0,\ D[\delta] = 0.$$

Устойчивость алгоритма 2 и возможность его применения для решения задачи автоматической сборки показана в [7]. Не составляет труда найти математическое ожидание и приблизи-

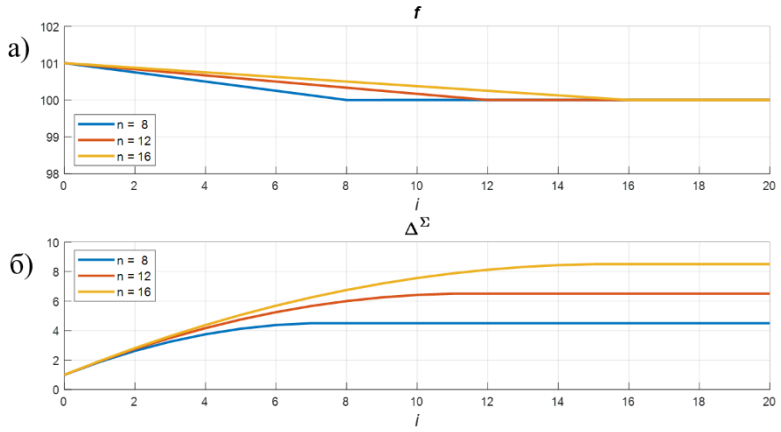


Рис. 3. Реализация работы алгоритма 1: а – стабилизация шага; б – смещение этикетки

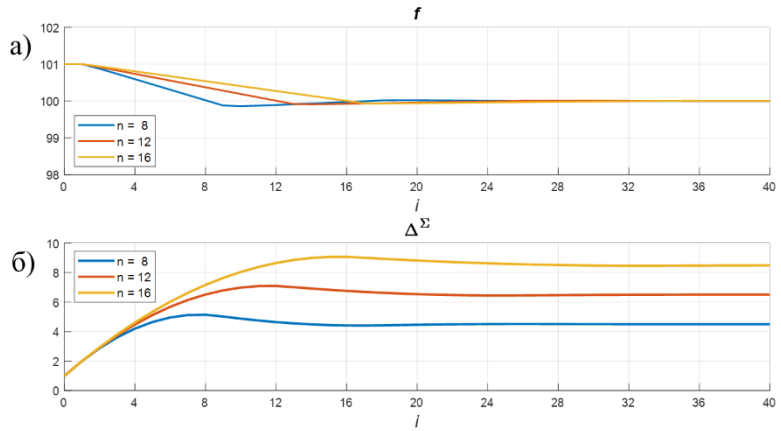


Рис. 4. Реализация работы алгоритма 2: а – стабилизация шага; б – смещение этикетки

тельное значение дисперсии перемещения f для алгоритма 2 [8]

$$M[f]=2L;\ D[f]=\frac{2}{n^2-n}\sigma^2.$$

Полученные результаты говорят о том, что у данного алгоритма при длине массива $n > 2$ дисперсия перемещения каретки f будет меньше дисперсии случайного внешнего воздействия. *Его работа* при параметрах (6) показана на рис. 4. Видно, что при использовании алгоритма 2, шаг стабилизируется через $2n$ шагов. Так же, как и у алгоритма 1, здесь наблюдается увеличение смещения этикетки относительно банки за время стабилизации шага с увеличением длины массива n.

Ограничением величины коррекции k является величина зазора w между контейнером и инструментом, показанная на рис. 5. Наиболее оптимальным является выбор значения $k=0.5 \div 0.75w$, чтобы при выполнении коррекции контейнер не попал на край инструмента. Положение контейнера относительно центра силовой станции сварки p^1 и силовой станции вырубки p^2 может быть вычислено следующим образом

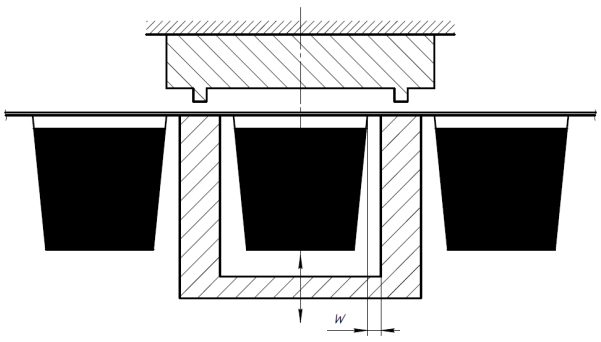


Рис. 5. Зазоры между контейнерами и инструментом

$$p_i^1 = \sum_{j=0}^{m/2-1} f_{i-j} - mA/2,$$

$$p_i^2 = \sum_{j=0}^{m-1} f_{i-j} - mA.$$

Реализация работы алгоритма 1 при параметрах (7) представлена на рис. 6. Из полученных результатов видно, что при заданном случайном воздействии, перемещение каретки f колеблется около шага печати A (рис. 6*а*). При этом присутствует смещение этикетки относительно контейнеров Δ^{Σ} (рис. 6*б*), которое удерживается в области допустимых значений с помощью алгоритма дополнительной коррекции. Также из рис. 6*в* и рис. 6*г* видно, что положение контейнера относительно инструмента находится в допустимых пределах

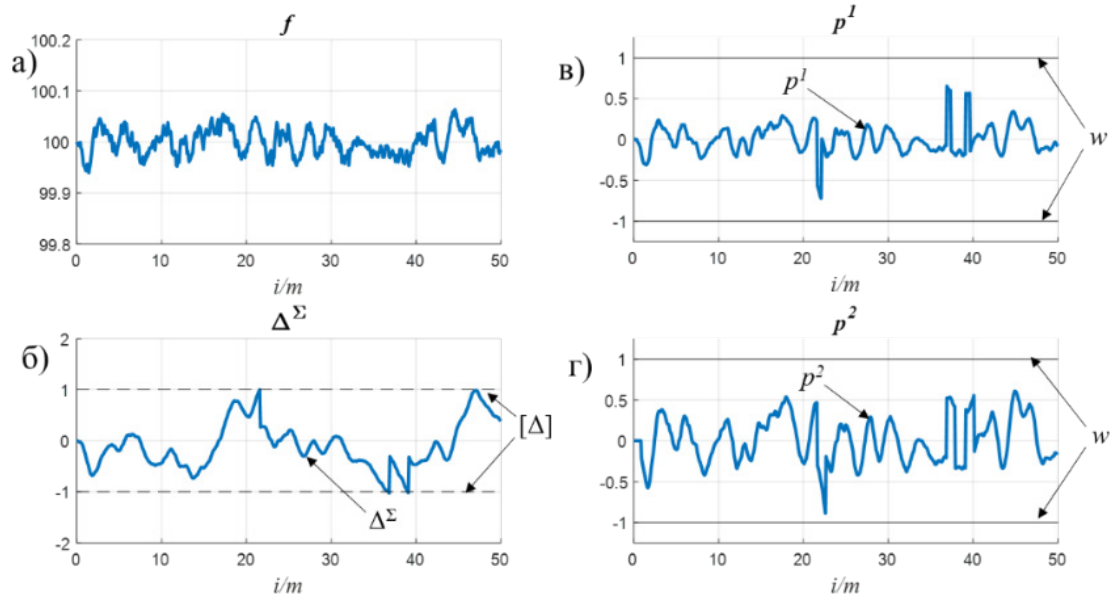


Рис. 6. Реализация работы алгоритма 1: а – шаг каретки; б – смещение этикетки; в – смещение на станции сварки; г – смещение на станции вырубки

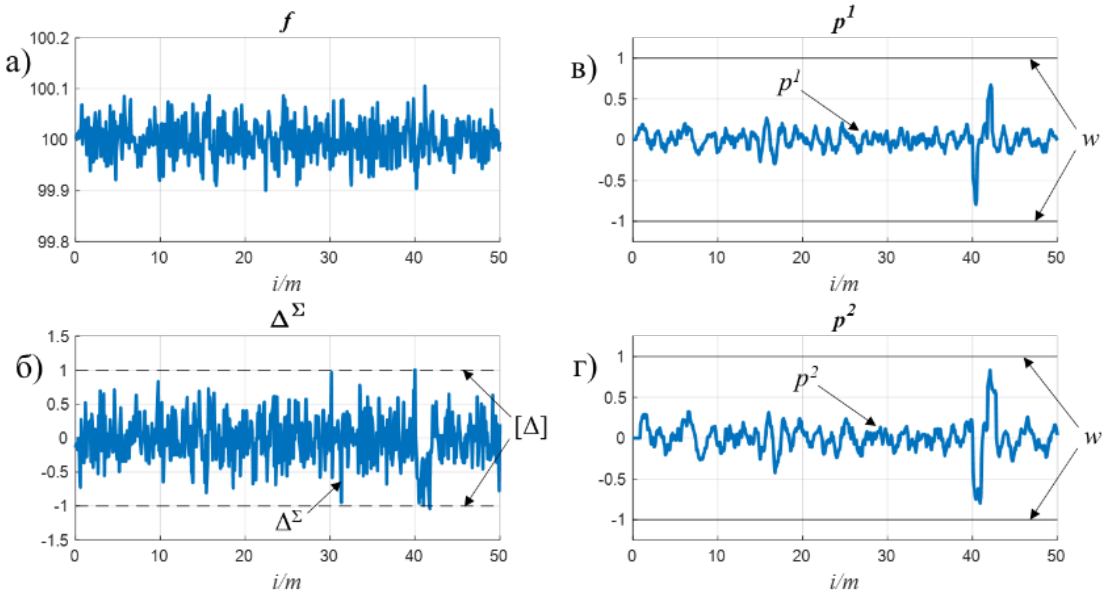


Рис. 7. Реализация работы алгоритма 1: а – шаг каретки; б – смещение этикетки; в – смещение на станции сварки; г – смещение на станции вырубки

$$n = 12,\ m = 12,\ L = 50,$$
$$\mathbf{S}^0 = \left[100 \quad \ldots \quad 100 \quad \ldots \quad 100\right],$$
$$M\left[\delta\right] = 0,\ D\left[\delta\right] = 0{,}025,$$
$$w = 1,\ k = 0{,}75 \qquad (7)$$

Реализация работы алгоритма 2 при параметрах (8) представлена на рис. 7. Видно, что при использовании алгоритма 2 перемещение каретки f (рис. 7*а*) также колеблется около шага печати A. Смещение этикетки относительно контейнеров Δ^{Σ} (рис. 7*б*) также находится в области допустимых значений. Из рис. 7*в*, *г* видно, что положение контейнера попадает в окно инструмента, что означает стабильную безаварийную работу. Важно отметить, что алгоритм 2 успешно работает с гораздо большим значением дисперсии внешнего воздействия δ

$$n = 12,\ m = 12,\ L = 50,$$
$$\mathbf{S}^0 = \left[100 \quad \ldots \quad 100 \quad \ldots \quad 100\right],$$
$$M\left[\delta\right] = 0,\ D\left[\delta\right] = 0{,}30,\ w = 1,\ k = 0{,}50. \qquad (8)$$

Выводы

На основании выполненного моделирования управляющих алгоритмов и полученных результатов для разработанной мехатронной системы синхронизации положений ленточных материалов было показано, что наибольшее влияние имеет число членов используемого массива, которое не должно быть больше жизненного цикла изделия. Параметр k, показывающий величину коррекции положения этикетки относительно контура контейнера, должен выбираться в диапазоне 0,50–0,75w. Например, в случае если производственный цикл m=12, а зазор в инструменте w=1, то для промышленной эксплуатации созданной мехатронной системы синхронизации положений ленточных материалов следует рекомендовать следующие значения параметров: n=12 и k=0,50.

Список источников

1. Некоторые проблемы создания современных автоматических линий на примере линии упаковки типа «формовка-фасовка-укупорка-вырубка» / Б. Л. Саламандра, Л. И. Тывес, К. Б. Саламандра, Г. К. Корендясев // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2013. № 3. С. 71–79.

2. *Korendyasev G. K. Salamandra B., Salamandra K.* Concerning one specific task of assembly in the automatic packing lines of the «Forming-Pre-Packing-Sealing-Cutting» type // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2013. Vol. 42. No 2. P. 159–165.

3. *Salamandra B.* Analysis of label position stabilization methods on automatic packaging machines // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2017. Vol. 46. No 2. P. 181–186.

4. *Chao Z., Chunhua Y., Yingting H.* Color code detection and correction device and color code detection and correction method. Патент № CN111717710A, 29.09.2020.

5. *Rens V., Henriks J., Joseph P.* Form-fill-seal machine. Патент № EP1203718A1, 08.05.2002.

6. *Melvin H.* Film Positioning Apparatus. Патент № US3861983A, 21.01.1975.

7. *Замурагин Ю. М., Саламандра Б. Л., Саламандра К. Б.* Применение алгоритмов стабилизации положения при автоматической сборке // XXXIV Междунар. инновационная конф. молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения: Сб. трудов конф. Москва, 07–09 ноября 2022 года / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, 2022. С. 164–169.

8. *Гмурман В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. 9-е изд., стер. М.: Высшая школа, 2003. 479 с.

УДК 681.515.4 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-221-225**

Д. Н. Карпухин*
аспирант
А. В. Бурковский*
кандидат технических наук, доцент
**Воронежский государственный технический университет*

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕМ АВТОНОМНОГО ОБЪЕКТА ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ

Приведено описание структуры генерации внутреннего энергоснабжения автономного объекта энергообеспечения и подсистемы электроснабжения на уровне потребления. Описан процесс управления динамикой перетоков мощности при помощи нейросетевого моделирования.
Ключевые слова: *система электроснабжения, подсистема генерации, система управления, математическая модель, нейронная сеть.*

D. N. Karpukhin*
PhD Student
A. V. Burkovsky*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**Voronezh State Technical University*

STRUCTURE OF THE INTERNAL POWER SUPPLY MANAGEMENT SYSTEM OF AN AUTONOMOUS POWER SUPPLY FACILITY

This article describes the structure of the generation of internal power supply of an autonomous power supply facility and the subsystem of power supply at the consumption level. The process of controlling the dynamics of power flows using neural network modeling is described.
Keywords: *power supply system, generation subsystem, control system, mathematical model, neural network.*

Введение

Электроэнергетика автономного объекта энергообеспечения (АОЭ) представляет собой сложную иерархическую структуру, объединенную технологическим процессом преобразования, передачи и потребления электрической энергии и мощности. Главными параметрами вышеуказанного технологического процесса являются обеспечение баланса между выработкой и потреблением энергии, а также напряжения питающей сети.

Подсистема генерации электрической энергией

Следует отметить, что данная структура является сложным сочетанием динамических распределительных подсистем. Обобщенная структура подсистемы генерации приведена на рис. 1.

Подсистема генерации состоит из двух частей: первичной энергосистемы (PPS) и вторичной (SPS). PPS – это система, которая управляет электроэнергией от фотоэлектрической решетки и контролирует заряд/разряд аккумулятора.

Напряжение данной системы составляет около 160 В, и время от времени оно меняется, так как фотоэлектрическая панель со временем изнашиваться и начинает преобразовывать меньше энергии.

Электроэнергия, получаемая от фотоэлектрической решетки, проходит через последовательный шунтирующий блок (SSU), который контролирует требуемое напряжение таким образом, что при потреблении электроэнергии, он увеличивает свое сопротивление тогда, когда напряжение избыточно. Это означает, что нагрузка увеличивается в тот момент, когда напряжение опускается ниже указанного значения, и собственное сопротивление блока уменьшается, тем самым заменяя недостающую нагрузку. Также этот блок осуществляет контроль напряжения, прежде чем оно будет передано на блок коммутации постоянного тока (DCSU). На-

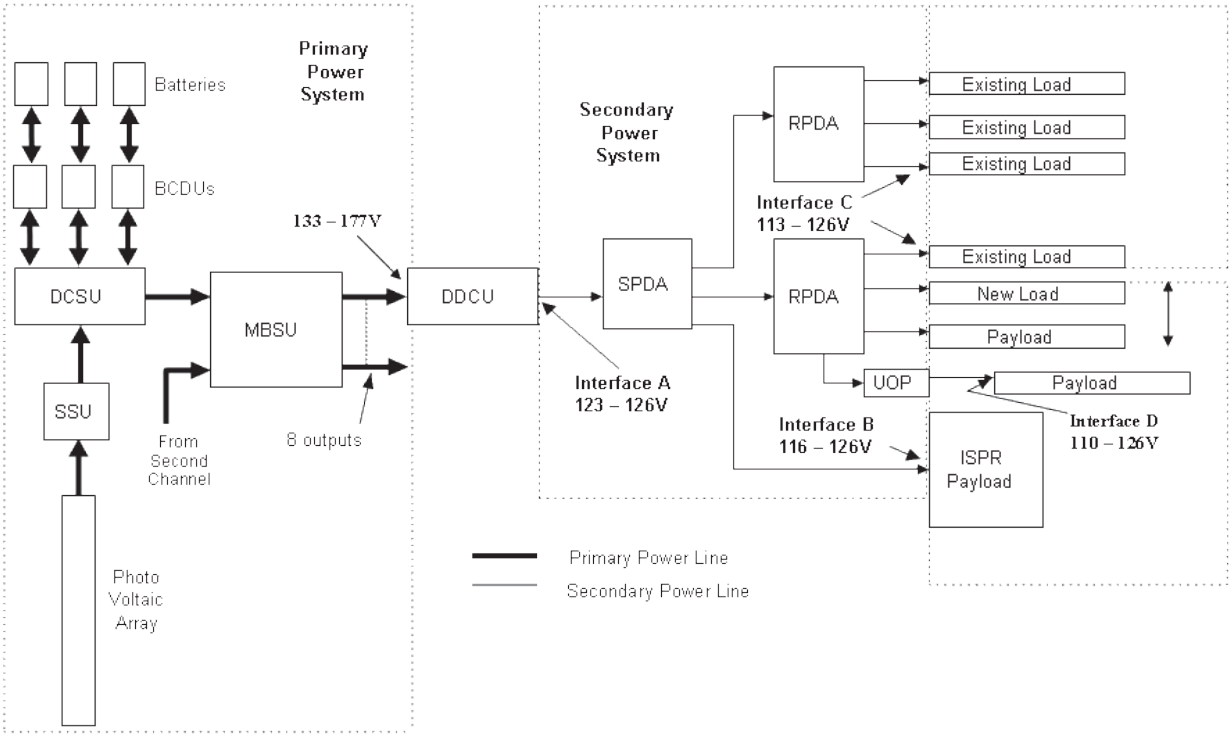


Рис. 1. Структура подсистемы генерации электроэнергии автономного объекта энергообеспечения

пряжение на блок DCSU поступает через автоматический выключатель SSU, который аналогичен электрическому автоматическому выключателю блока коммутации главной шины (MBSU) и блока зарядки/разрядки аккумуляторов (BCDU). BCDU действует как чип управления зарядкой, он необходим, чтобы продлить срок службы батареи контролируя потенциал зарядки и регулируя разность электрических потенциалов, требуемых для нагрузки между ними. Затем электроэнергия поступает в блок управления питания (MBSU), который является основным блоком, стоящим перед входом в систему SPS. MBSU имеет дополнительные выходы для оборудования, которому требуется повышенная мощность. В блоке преобразования напряжения (DDCU) происходит дальнейшее изоляция и понижение напряжения до значения 124,5 В, что является стандартным значением для SPS.

После блока DDCU электроэнергия переходит во вторичные узлы распределения электропитания (SPDA), которые осуществляют управление подачей энергией на удаленные узлы распределения (RPDA). SPDA отвечает за контроль тока, поэтому подача напряжения на RPDA является важной задачей. На автономном объекте энергообеспечения (к примеру, международной космической станции) имеются два отдельных RPDA, которые отвечают за самостоятельное управление полезной нагрузкой.

Подсистемы электроснабжения, уровень потребления

Подсистема генерации является структурным ядром всей электроэнергетики на АОЭ. Результаты, полученные относительно нее, делают данную подсистему первостепенной с точки зрения анализа перемещения электроэнергии и могут быть, представлены на более высокие уровни иерархии.

В качестве примера на рис. 2 приведены основные потребители электроэнергии на автономном объекте энергообеспечения (международной космической станции).

Нейросетевое моделирование процесса управления динамикой перетоков мощности автономных объектов электроснабжения

В настоящее время одной из актуальных проблем является определение потерь электроэнергии, так как обладая реальными данными, можно максимально точно прогнозировать потери мощности и возникающие затраты на их компенсацию [1].

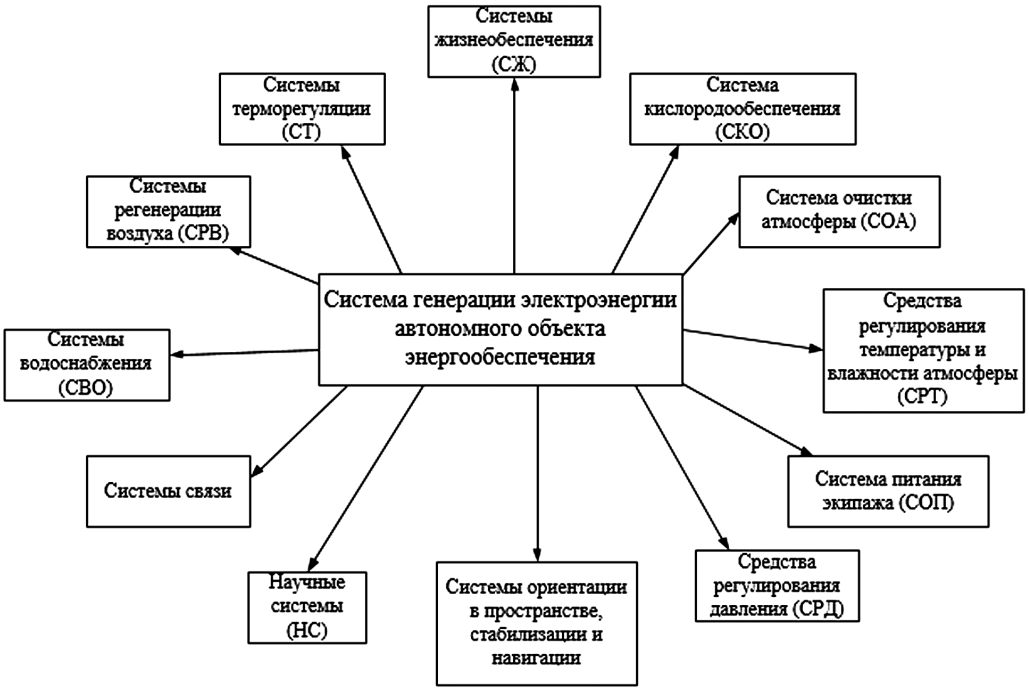


Рис. 2. Основные потребители электроэнергии автономного объекта энергообеспечения

Вышеперечисленная информация подводит к тому, что задачи управления перетоками электроэнергии в АОЭ могут быть представлены как, упорядоченные во времени параметры данных, которые основаны на анализе сопровождающей информации. Для подобного рода вопросов обычно используют параметрические модели, но в настоящее время наиболее перспективным направлением для решения подобных задач являются искусственные нейронные сети (ИНС) [2], [3].

Представление моделей с учетом неопределенных факторов типов – Мамдани и Такаги – Сугено, с точки зрения экстраполяции вызывает наибольший практический интерес к параметрам энергосистемы. Для реализации модели Мамдани, структура преобразуется к виду

$$R^u = If \;\; x(t-1) \;\; is \;\; X_1^u \;\; and,...,and \;\; x(t-r) \;\; is$$

$$X_r^u \;\; then \;\; y(t) = a^u, u = 1,u. \qquad (1)$$

В случае модели Такаги-Сугено выражение приобретает вид

$$R^u = If \;\; x(t-1) \;\; is \;\; X_1^u \;\; and,...,and \;\; x(t-r) \;\; is$$

$$X_r^k \;\; then$$

$$y(t) = a_0^u + \sum_{l=1}^{r} a_1^u y(t-1), \; u = 1,u. \qquad (2)$$

В то же время высокая интенсивность режимов работы, зачастую трудные условия эксплуатации, а также большое разнообразие используемого оборудования приводят к тому, что современные электроэнергетические комплексы представляют в виде многоуровневой иерархической структуры и процесс принятия решений становится более длительным. С другой стороны, составными частями реального динамического объекта являются различного рода неопределенности. Чаще всего эти неопределенности обусловлены тем, что: 1) замер необходимого параметра возможен не во всех точках технологического процесса; 2) информация, которую получают с объектов управления, не всегда является достаточно неточной; 3) передача информация по уровням управления происходит с задержкой; 4) модели объектов контроля и управления не всегда являются достаточно точными.

Такого рода неопределенности могут создавать погрешности в начальных и граничных условиях моделей. Неточности моделей могут возникать из-за того, что: 1) сложный процесс стараются представить излишне идеальным; 2) существенные связи в технологическом процессе могут быть разорваны; 3) характеристики по которым фактически работает оборудование, могут быть замены на паспортные; 4) допущения, принятые при выводе уравнений, могут

быть нарушены. Работы в таких условиях затрудняет использование стандартных систем автоматики, поэтому достаточно важным является возможность использования для описания режимов работы оборудования, моделей на базе ИНС.

Использование ИНС позволяет учитывать в расчетах множество различных факторов, которые влияют на потери электроэнергии и осуществлять расчет потерь мощности с минимальной погрешностью даже в условиях неполноты информации.

Системы управления в основе которых строят ИНС [4] представлены в рамках следующей структуры закона управления

$$u(k) = NC(y(k)), y(k-1), u_r(k)); \quad (3)$$

$$t_{k+1} = t_k + \Delta, \Delta = 0{,}1c, \quad (4)$$

где $NC(...)$ – осуществляемое нейронной сетью функциональное преобразование; u_r – сигнал задания (уставка); Δ – шаг дискретизации системы управления.

На представленной схеме рис. 3 сигнал внешнего задания $ur(k)$ поступает на вход нейроконтроллера, обратная связь которого располагается по выходу объекта $y(k)$, сигнал обратной связи $y(k–1)$ является задержанным, и находится на предыдущем шаге, а выход нейроконтроллера формирует сигнал управления $u(k)$. Данная технология позволяет путем создания адаптивной системы, применить полученные результаты для управления динамическими нелинейными объектами.

Для того чтобы обеспечить оптимальное поведение объекта в процессе функционирования системы, необходимо определить закон регулирования в этом и состоит задача управления. И для ее решения необходимо ввести контур адаптации к основному контуру системы

Рис. 3. Схема взаимодействия дискретной нейронной сети и объекта энергоснабжения

Рис. 4. Обобщенная схема адаптивной системы управления

управления как видно на рис. 4. Адаптацию в условиях неопределенности [5], можно сопоставить с оптимизацией для управления в условиях недостаточной априорной информации [6], [7].

Заключение

В заключение стоит отметить, что применение на практике ИНС позволит добиться достаточно точных прогнозов по потерям электроэнергии, которые позволят значительно ускорить процесс решение задач текущего планирования и управления режимами функционирования автономного объекта энергообеспечения в режиме реального времени.

В то же время интерес к анализу факторов, оказывающих влияние на функционирование электроэнергетики недостаточен, и основной упор делается на оптимизацию, что при низком уровне взаимодействия пограничных подсистем является причиной для повышения энергопотребления отечественного энергетического комплекса. Для решения данной задачи наиболее перспективным является оптимизация системы энергообеспечения посредством внедрения адаптивных систем управления на базе искусственных нейронных сетей.

Список источников

1. Материаловедение и проблемы энергетики / Под ред. Г.Либовица, М. Уиттингема. М.: Мир, 1982. 575 с.

2. *Бурковский В. Л., Гусев К. Ю.* Нейросетевая модель прогнозирования динамики экономических по-

казателей // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 4. С. 80–82.

3. *Батыршин И. З., Недосекин А. О., Стецко А. А.* Нечеткие гибридные системы. Теория и практика. М.: Физматлит, 2007. 208 с.

4. *Машалов Е. В., Неуймин В. Г., Шубин Н. Г.* Программное обеспечение синтеза и актуализации единой расчетной модели // Материалы межрегионального научно-технического семинара «Оперативное управление электроэнергетическими системами – новые технологии». Сыктывкар, 2003.

5. *Демура А. В.* Моделирование и прогнозирование на основе искусственных нейронных сетей // Известия вузов. Электромеханика. 2005. № 5. С. 29–32.

6. *Терехов В. А., Тюкин И. Ю., Ефимов Д. Б.* Нейросетевые системы управления. М.: Высшая школа, 2002. 184 с.

7. *Каллан Р.* Основные концепции нейронных сетей. М.: Вильяме, 2003. 288 с.

УДК 621.865.8 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-226-229**

Д. В. Куцулим*
магистрант
А. В. Рысин*
старший преподаватель, аспирант
С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

УПРАВЛЕНИЕ ПРИВОДАМИ УНИВЕРСАЛЬНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА

Рассмотрены проблемы проектирования и конструирования универсальной промышленной роботизированной ячейки и периферийного оборудования. Основными методами исследования стали теоретическое исследование принципов работы датчиков и систем для автоматизации производственных процессов, гипотезы о возможностях применения их для универсальных решений автоматизации, а также эмпирические методы на собранном стенде для отладки периферийного оборудования. В результате работы был сформирован список компонентной базы элементов системы автоматизации, позволяющих выполнять поставленное техническое задание.
Ключевые слова: *промышленная робототехника, манипулятор, электрический привод, бесколлекторный двигатель постоянного тока, автоматизация производственных процессов.*

D. V. Kutsulim*
Postgraduate Student
A. V. Rysin*
Senior Lecturer, PhD Student
S. V. Solyonyj*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DRIVE CONTROL OF A UNIVERSAL INDUSTRIAL ROBOT

The problems of designing and constructing a universal industrial robotic cell and peripheral equipment are considered. The main research methods were a theoretical study of the principles of operation of sensors and systems for automating production processes, hypotheses about the possibilities of their application for universal automation solutions, as well as empirical methods on an assembled stand for debugging peripheral equipment. As a result of the work, a list of the component base of the elements of the automation system was formed, allowing to fulfill the set terms of reference.
Keywords: *Industrial robotics, manipulator, electric drive, brushless DC motor, industrial process automation.*

В настоящее время происходит четвертая промышленная революция, называемая Индустрия 4.0. Она подразумевает переход от общей автоматизации процессов к расширению спектра выполняемых работ с использованием связи между исполнительными устройствами через разные каналы связи, например Ethernet. Это изменение направлено на кастомизацию производимой продукции под конкретные критерии и параметры, задаваемые заказчиками индивидуально. По этой причине необходимы универсальные устройства, способные выполнять широкий спектр задач без физического изменения, поддерживающих кастомизацию отдельных частей производства или всех технологических процессов [1].

Задача состоит в том, чтобы рассчитать, спроектировать и собрать универсального промышленного робота, не требовательного к элементной базе и программному обеспечению. На сегодняшний день все промышленные роботы выпускаются частными компаниями, активно конкурирующими между собой за доминирование на рынке промышленной робототехники. Эти компании выпускают промышленных роботов, которые программируются на собственных языках, в основе которых лежит логика Паскаль. Для базового программирования не

нужен высокий порог вхождения, так как вся работа заключается в перемещении осей робота в контрольные точки, записывания координат всех осей в память и описания типа траектории движения. При прохождении обучения открывается более низкий уровень программирования, позволяющий еще включать внешние входы/выходы, прописывать циклы и условия [2].

Компонентная база роботов базируется на электро- и гидроприводах для движения осей в декартовых или сферических координатах, а также пневмо- и электроприводах в захватных устройствах, при условии, что не используется специализированный концевой эффектор, для выполнения сложных задач, например сварка, покраска и т. п. Блок управления приводами выносится в отдельный блок, который подключается к промышленному роботу и персональному компьютеру с помощью соединительных кабелей. Дополнительно подключается пульт управления, с которого производится процесс программирования робота, отладки написанных программ и конфигурирование робота.

Все эти составляющие могут отличаться у каждого робота и не имеют одной общей нормативной базы. Разрабатываемый робот планируется как альтернатива всем существующим промышленным роботам с возможностью программирования на языке Pyton, заменой концевых эффекторов и изменении количества степеней свободы.

Для выполнения поставленной задачи необходимо выбрать тип приводов, систему управления, контроллер и разработать систему электроснабжения всех приводов робота. Для этого составлено техническое задание на робота, способного оперировать полезной нагрузкой до 5 кг, скорости передвижения осей не превышают 2 м/с, робот имеет несколько степеней защиты и несколько видов безопасных остановов, в зависимости от вида аварийной ситуации.

При таких, относительно небольших по массе полезных нагрузках, которые включают в себя устройство захвата, инструмент, сварочное оборудование и т. д., чаще всего используют электрический привод. Гидропривод используют при массе нагрузки от 100 кг, а пневмопривод чаще всего используют только в захватных устройствах. Это обуславливается меньшей точностью позиционирования таких приводов относительно электроприводов, однако они имеют больший коэффициент перегрузки и лучше реагируют на внешние воздействия. В нашем случае пневмопривод не будет использоваться для установки пневмозахвата, но будут предусмотренных пневмомагистрали внутри робота, для дальнейшего масштабирования системы.

В качестве электропривода используют электрические двигатели постоянного или переменного тока с контурным управлением по принципу подчиненного управления. Контуры управления делятся на регулирование по току, скорости и положению. Выбор осуществляется между сервоприводами, двигателями постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, двигателями постоянного тока с параллельным возбуждением, синхронные машины переменного тока с постоянными магнитами и бесколлекторными двигателями постоянного тока.

Двигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов и с параллельным возбуждением имеют один существенный недостаток – щеточно-коллекторный узел. Это устройство передачи постоянного тока на обмотки якоря через ламели, самое слабое место двигателя, требующее регулярного обслуживания и обладающее низкой надежностью. Низкая надежность обусловлена большим количеством ламелей, которые могут деградировать от искрения, перегрузок и механических вибраций. Дополнительно, приводы промышленного робота работают в режиме работы S5 согласно ГОСТ Р 52776 и МЭК 60034-1. Этот режим подразумевает повторно-кратковременный режим работы электродвигателя с электрическим торможением и влиянием пусковых процессов. Из-за большой инерции и высоких значениях пусковых токов, которые могут составлять 5–7 номинальных токов якоря, такие двигатели будут быстро выходить из строя и не подходят для использования в качестве приводов движения осей промышленного робота.

Так как щеточно-коллекторный узел является существенным недостатком, рассмотрим двигатели, состоящие без него. Это бесколлекторные двигатели постоянного тока и синхронные двигатели с постоянными магнитами на роторе. Сервоприводы могут выполняться как на основе коллекторных двигателей, так и бесколлеторных двигателей. Сервопривод – это электромеханическое устройство, имеющее в своем составе двигатель, редуктор и обратную связь на основе потенциометра, который изменяет значение сопротивления в зависимости от угла поворота. Его конструкция имеет существенно большие габариты, чем у других бесколлеторных машин, однако обладает повышенной точностью и моментом на выходном валу благодаря понижающему редуктору.

Синхронная машина приводится во движение последствием подачи переменного напря-

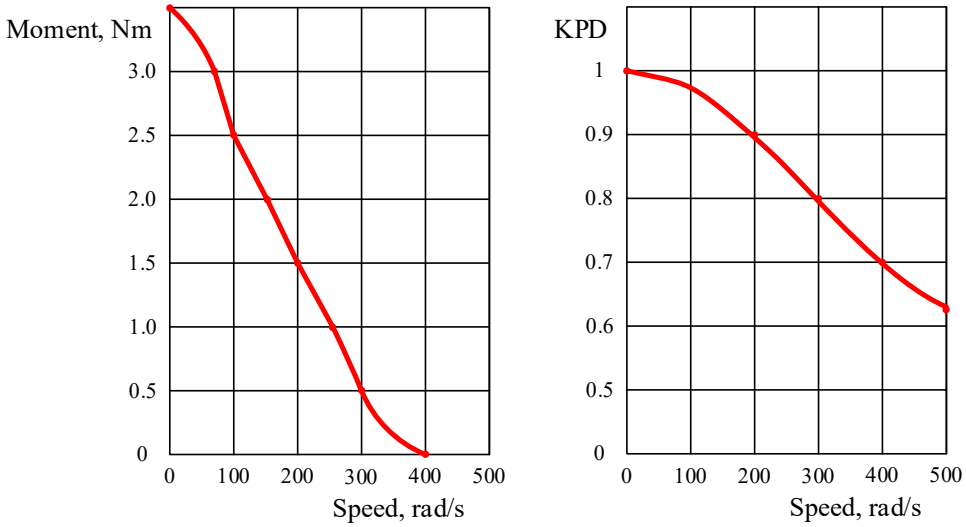


Рис. 1. Механическая характеристика и зависимость КПД от скорости синхронного двигателя с постоянными магнитами

жения на обмотки статора [3]. Бесколлекторный двигатель постоянного тока работает по схожему принципы, однако питание осуществляется от источника постоянного тока, а переключение производится посредством силовых высокочастотных IGBT ключей с низкой емкостью затвора. Перебои в сети переменного тока могут повлиять на выполнение программы робота, следовательно, в блоке управления робота необходим дополнительный силовой преобразователь, обеспечивающий бесперебойною подачу переменного тока – выпрямитель с последовательно включенным инвертором. Механическая характеристика синхронного двигателя с постоянными магнитами и зависимость КПД от скорости вращения представлены на рис. 1. Моделирование приведено для мощности двигателя 100 Вт, напряжение питания 24 В, номинальная скорость 3000 об/мин.

Для бесколлекторного двигателя постоянного тока, мощностью 100 Вт, напряжением питания 24 В и номинальной скоростью 3000 об/мин также построены механическая характеристика и зависимость КПД от скорости вращения (рис. 2).

Из графиков 1 и 2 видно, что хоть по форме они и похожи, но у бесколлекторного двигателя выше момент и КПД. Это связанно с тем, что в синхронной машине происходят переходные процессы, связанные с намагничиваем по петле гистерезиса и низкой перегрузочной способности, при неноминальных параметрах питающей сети [4].

Исходя из проведенных исследований был выбран бесколлекторный двигатель постоянного тока. В сравнении с сервоприводом на основе того же типа двигателя он выигрывает по массе, стоимости и точности. Поскольку мы будем использовать принцип подчиненного регулирования из трех контуров управления, у нас получится более высокая динамическая устойчивость при резких внешних воздействиях.

Управление бесколлекторным двигателем осуществляется с использованием датчика положения ротора для правильной коммутации фаз и/или управления током. Для работы двигателя требуется только знание шести моментов коммутации фаз за период времени, поэтому обычно используются датчики Холла. Кроме того, датчики электромагнитного переменного магнитного сопротивления (VR) или акселерометры широко применяются для измерения положения и скорости двигателя.

В настоящее время, поскольку миниатюрные бесщеточные двигатели используются во многих устройствах, разрабатываются новые датчики положения, такие как вертикальный датчик Холла с тремя ответвлениями. Принцип соединения бесщеточного двигателя с этим датчиком напоминает магнитный угловой энкодер на основе трехмерных датчиков Холла. Постоянный магнит закреплен на конце вращающегося вала, а магнитный датчик расположен ниже, и магнит создает магнитное поле, параллельное поверхности датчика. Эта поверхность соответствует направлениям чувствительности магнитного датчика. Трехфазным бесщеточным двигателям для управления требуются три сигнала со сдвигом фаз на 120°, поэтому для улучшения характеристик двигателя можно ис-

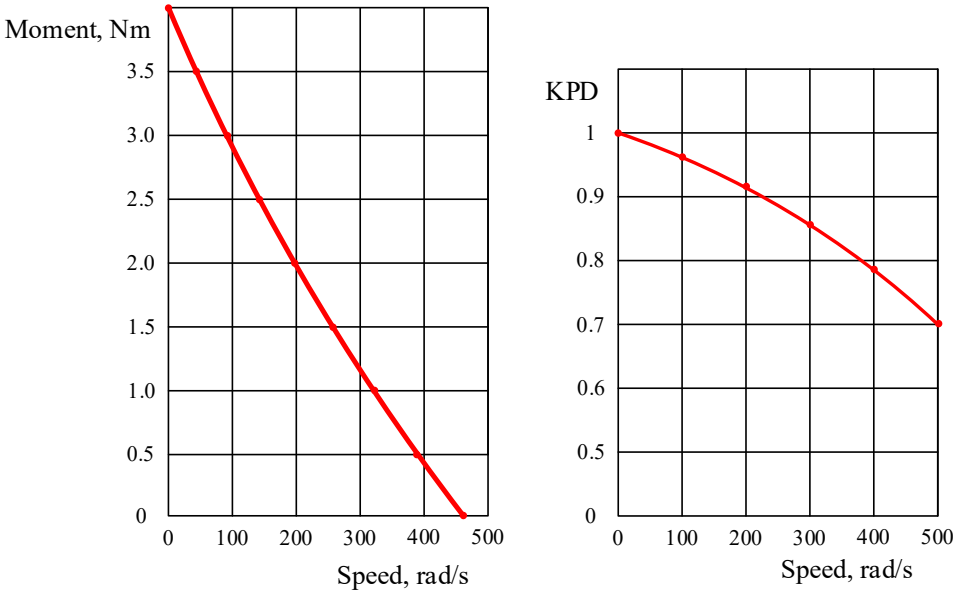


Рис. 2. Механическая характеристика и зависимость КПД от скорости бесколлекторного двигателя постоянного тока

пользовать регулирование с обратной связью. Каждая ветвь может быть интерпретирована как половина вертикального датчика Холла и повернута на 120° по сравнению с другой. Используется только половина вертикального датчика Холла, поскольку мало места для пяти электрических контактов (два для напряжения питания и три для сигнальных контактов датчика Холла). Этот датчик автоматически создает три сигнала с фазовым сдвигом 120°, которые непосредственно соответствуют сигналам управления двигателем, чтобы упростить управление двигателем в конфигурации с обратной связью. Первое выравнивание выполняется между ориентацией ротора и постоянным магнитом, а второе выравнивание – между статором и датчиком. Это выравнивание позволит получить информацию о движении двигателя и информацию об угловом положении его вала.

В качестве датчиков обратной связи будут использоваться датчик тока, датчики Холла и тахометр. По показаниям этих датчиков будут настроены ПИД регуляторы. Дальнейшая работа будет направлена на расчет и выбор двигателей, а также синтез системы управления двигателя и моделирование его работы при перегрузках [5].

Список источников

1. *Корнелюк А. Д., Бакланов Б. Р., Туркова К. А.* Концепция гибкого производства на примере роботизированных ячеек Arrival // Современные проблемы цивилизации и устойчивого развития в информационном обществе: сб. материалов X Междунар. научно-практ. конф. М., 2022. С. 277–284.

2. Промышленная робототехника / С. В. Солёный, В. Е. Белай, А. В. Рысин, Г. Ю. Беспятый. СПб.: ГУАП, 2021. 127 с.

3. *Корнеев В. В., Приступ А. Г.* Проектирование синхронного генератора с постоянными магнитами // Технические науки – от теории к практике. 2013. № 23. С. 106–113.

4. Совершенствование конструкции подъема щеточного узла в асинхронных двигателях с фазным ротором / Э. М. Абдрафиков, В. П. Кузьменко. С. В. Солёный, А. В. Рысин // Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 4(130). С. 114–118.

5. Neuro-fuzzy control system of power unit in hybrid vehicle / S. V. Solenyi, S. A. Serikov, V. P. Kuzmenko et al // Metrological support of innovative technologies: Материалы III Международного форума в рамках празднования 80-летия Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, 300-летия Российской академии наук, Санкт-Петербург, 4 марта 2021 года / Под редакцией В. В. Окрепилова. СПб.: ГУАП, 2021. Р. 170–172.

УДК. 681.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-230-233**

А. Л. Ляшенко*
кандидат технических наук, доцент
Б. В. Давидович*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА С ГОЛОСОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Рассмотрена задача поддержания технологических параметров котельного агрегата на заданном уровне. В качестве примера представлена система управления отопительного оборудования, являющаяся частью системы «Умный дом». В рассматриваемой системе предусмотрено голосовое управление. Разработана математическая модель технологических процессов, протекающих в объекте управления, а также реализация системы управления в SCADA-системе Trace Mode.
Ключевые слова: *котельный агрегат, математическая модель, дифференциальные уравнения, синтез, анализ, контроль, диагностика, моделирование, график переходного процесса, распределенный регулятор, SCADA-система.*

A. L. Liashenko*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
B. V. Davidovich*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM FOR A BOILER UNIT WITH VOICE CONTROL

The problem of maintaining the technological parameters of the boiler unit at a given level is considered. As an example, the heating equipment control system, which is part of the Smart Home system, is presented. The system in question provides voice control. A mathematical model of technological processes occurring in the control object has been developed. The implementation of the control system in the Trace Mode SCADA system is considered.
Keywords: *Boiler unit, mathematical model, differential equations, synthesis, analysis, control, diagnostics, simulation, transient graph, distributed controller, SCADA system.*

Постановка задачи

В работе рассмотрена автоматическая система регулирования (АСР) отопительного оборудования, являющаяся частью системы «Умный дом» и предусматривающая возможность голосового управления. В настоящее время на рынке имеется ограниченное количество технических решений, позволяющих качественно распознавать голосовые команды. Имеющиеся требуют либо большие объемы дорогостоящего оборудования, либо наличия быстрого интернета. На данный момент только четыре фирмы предлагают реализацию голосового управления в системах умного дома. К ним относятся Amazon, Google, Apple и Яндекс. Рассмотрим вопрос разработки системы управления без выхода в сеть Internet и с применением SCADA-системы, что позволит применять полученные результаты на других технологических процессах теплоэнергетики.

Разработка системы управления

Рассмотрим управление котельным агрегатом отопительной системы. Данные устройства являются сложными объектами автоматического регулирования с большим числом регулируемых параметров [1].

В АСР питания котла водой реализован принцип комбинированного регулирования. Регулятор питания должен обеспечить постоянство уровня воды независимо от нагрузки котла и возмущающих воздействий.

На рис. 1 представлена схема регулирования питания барабана котла.

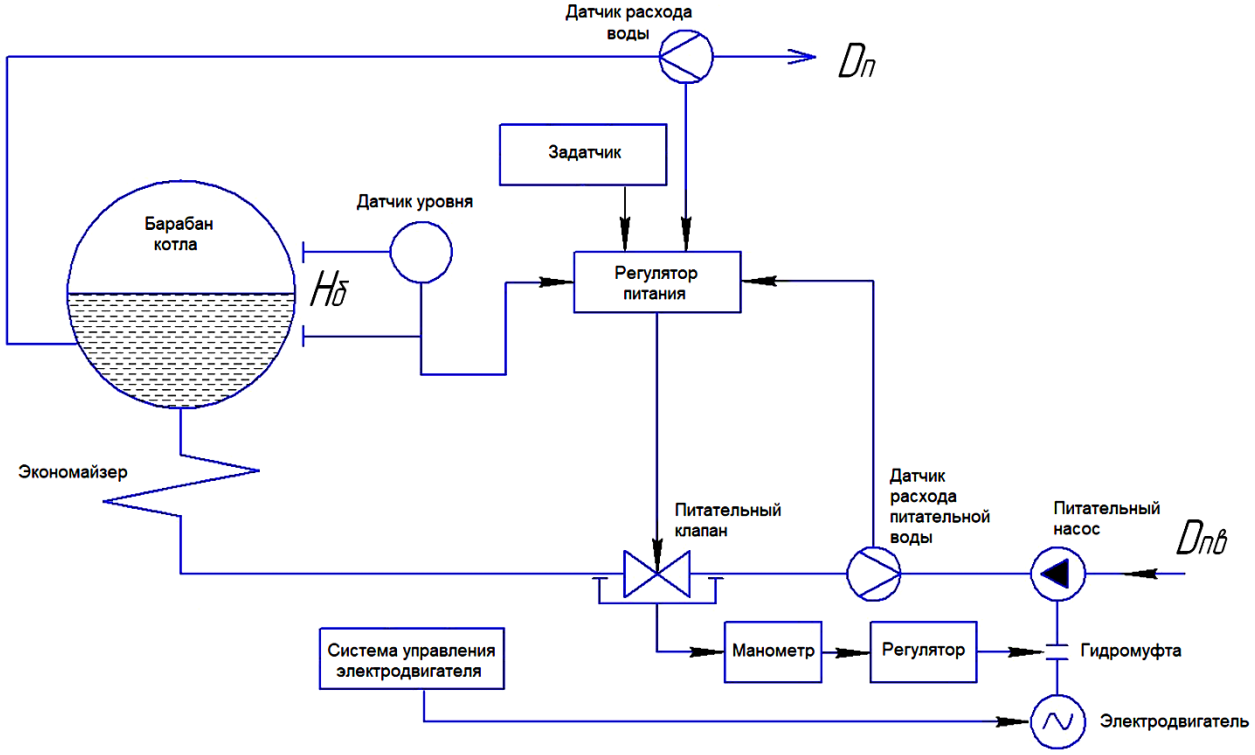


Рис. 1. Схема регулирования питания котла

При составлении математической модели (ММ) при описании тепловых процессов в котельном агрегате применялись уравнения теплопроводности [2]. В качестве примера запишем уравнение (1) для внутреннего корпуса котла

$$\frac{\partial T_1(x,\phi,R,t)}{\partial t} = a_1\left[\begin{array}{l}\dfrac{\partial^2 T_1(x,\phi,R,t)}{\partial R^2}+\dfrac{1}{R}\dfrac{\partial T_1(x,\phi,R,t)}{\partial R}+\\ +\dfrac{1}{R^2}\dfrac{\partial^2 T_1(x,\phi,R,t)}{\partial \phi^2}+\dfrac{\partial^2 T_1(x,\phi,R,t)}{\partial x^2}\end{array}\right]. \quad (1)$$

Для водяной рубашки

$$\frac{\partial T_3(x,\phi,R,t)}{\partial t} = a_3\left[\begin{array}{l}\dfrac{\partial^2 T_3(x,\phi,R,t)}{\partial R^2}+\dfrac{1}{R}\dfrac{\partial T_3(x,\phi,R,t)}{\partial R}+\\ +\dfrac{1}{R^2}\dfrac{\partial^2 T_3(x,\phi,R,t)}{\partial \phi^2}+\dfrac{\partial^2 T_3(x,\phi,R,t)}{\partial x^2}\end{array}\right]- 9\frac{\partial T(x,\phi,R,t)}{\partial x}. \quad (2)$$

Для внешнего корпуса

$$\frac{\partial T_4(x,\phi,R,t)}{\partial t} = a_4\left[\begin{array}{l}\dfrac{\partial^2 T_4(x,\phi,R,t)}{\partial R^2}+\dfrac{1}{R}\dfrac{\partial T_4(x,\phi,R,t)}{\partial R}+\\ +\dfrac{1}{R^2}\dfrac{\partial^2 T_4(x,\phi,R,t)}{\partial \phi^2}+\dfrac{\partial^2 T_4(x,\phi,R,t)}{\partial x^2}\end{array}\right]. \quad (3)$$

После получения полной ММ с учетом граничных условий был проведен численный эксперимент, дл этого на входе системы был сформирован сигнал вида (4), по результатам прохождения которого был получен отклик системы

$$U(x,y,p) = C_{\eta,\gamma}(s)\sin(\Psi_\eta \cdot x)\cdot\sin(\overline{\Psi}_\gamma \cdot y), \quad (4)$$

где $C_{\eta,\gamma} = e^{j\omega\tau}$; $\Psi_\eta = {\pi\cdot\eta}/{x_l}$; $\overline{\Psi}_\gamma = {\pi\cdot\gamma}/{r_l}$.

По результатам эксперимента были получены разгонные характеристики для контрольных точек объекта. С помощью полученных характеристик произведена идентификация параметров передаточных функций, используемых при дальнейшем моделировании объекта и расчета настроек распределенного регулятора.

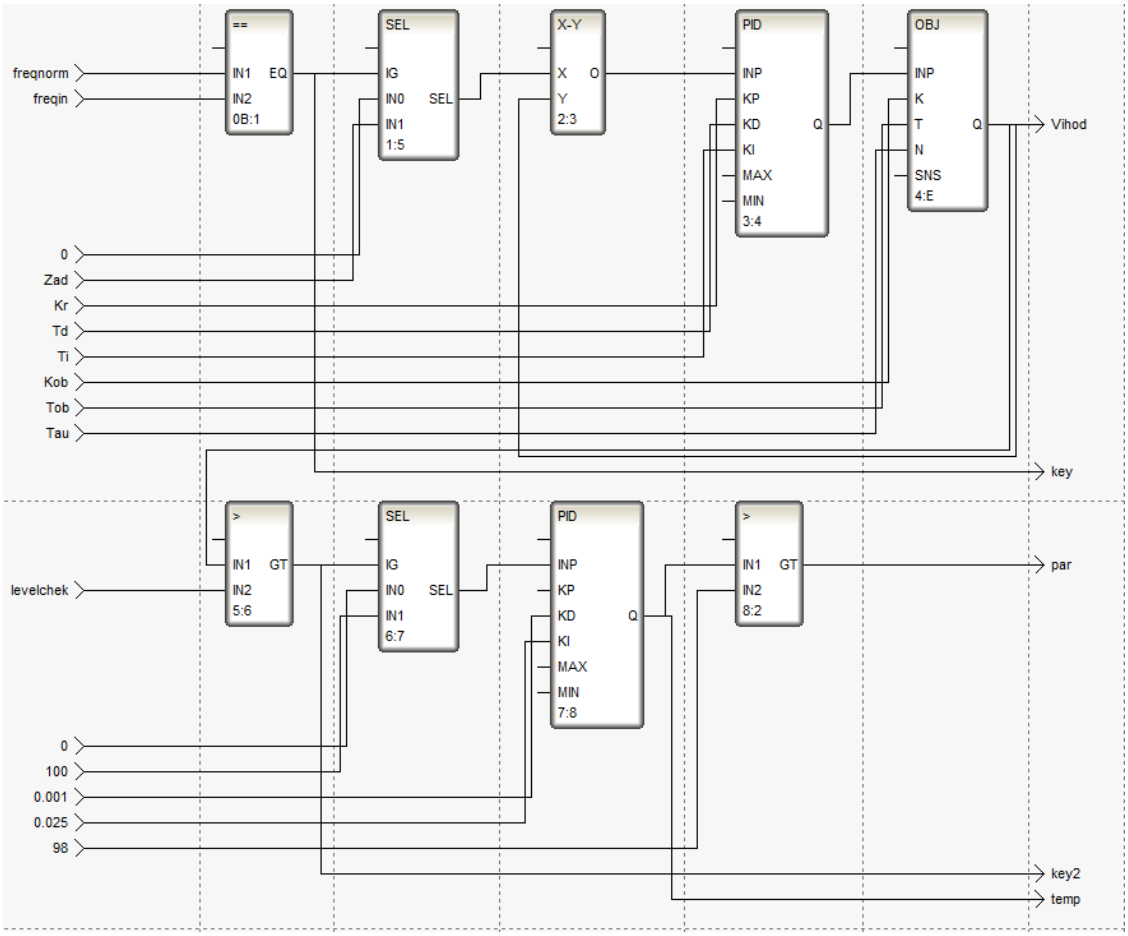


Рис. 2. Фрагмент программы на языке Техно FBD

В соответствии с [3] передаточная функция распределенного регулятора имеет вид

$$W(x,y,p) = \\ = 10.097 \cdot \left[\frac{530.38632-1}{530.38632} - \frac{1}{530.38632} \nabla^2 \right] + \\ +0.012441 \cdot \left[\frac{480.11007-1}{480.11007} - \frac{1}{480.11007} \nabla^2 \right] \times \\ \times \frac{1}{p} + 0.25032 \left[1 - 0 \cdot \nabla^2 \right] \cdot p. \qquad (5)$$

Для управления объектом выбрана SCADA-система Trace Mode. На рис. 2 представлен фрагмент программы, осуществляющий запуск системы.

Работа системы начинается с запуска подсистемы распознавания голоса. В основе подсистемы лежит устройство сравнения кодовых комбинаций. Голосовая команда «Я дома» переводится в кодовую комбинацию, которая на устройстве сравнения соизмеряется с другими комбинациями, которые поступают на вход системы. При совпадении кодовой комбинации с той, которая была записана заранее, на выходе устройства будет формироваться сигнал в виде логической 1. Добавим к данному устройству индикатор, который горит красным при несовпадении и зеленым при совпадении кодовых комбинаций.

При совпадении кодовых комбинаций загорается зеленый индикатор и формируется задание на заполнение котла водой.

После достижения заданного количества воды система контроля уровня формирует сигнал, по которому запускается нагревательный элемент. О включении нагревателя сигнализирует второй индикатор, загорающийся зеленым цветом (рис. 3).

Далее система будет поддерживать температуру на указанном уровне. В случае нагрева воды до 100 градусов начнется процесс парообразования. При этом на графическом экране появится индикатор «Пар».

При необходимости отключить системы подается звуковая команда «Я ушел». Как и при включении формируется кодовая комбинация,

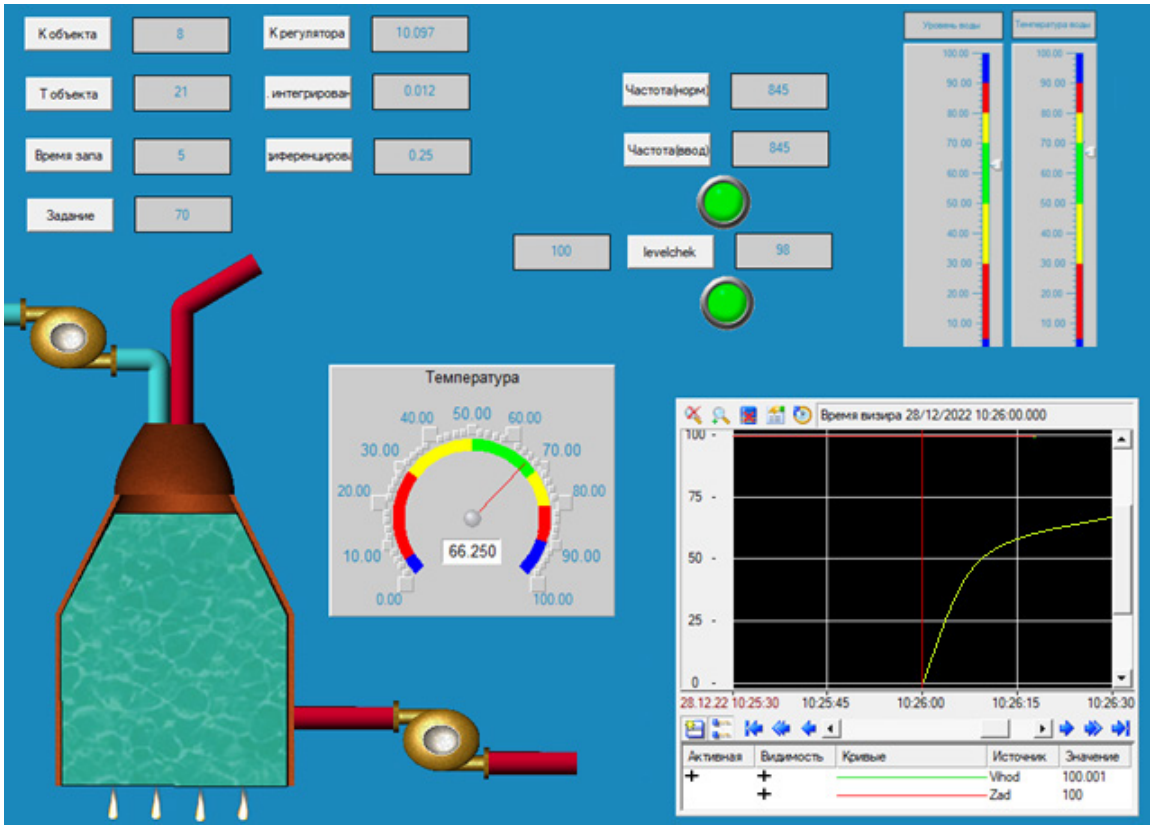


Рис. 3. Графический экран работающей системы

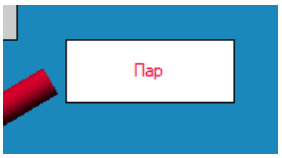


Рис. 4. Индикатор «Пар»

которая сравнивается с заранее записанной. В случае совпадения происходит отключение нагревателя.

Заключение

Таким образом, была составлена математическая модель тепловых процессов котельного агрегата отопительной системы, на основе которой была разработана система управления, обеспечивающая запуск и останов устройства при помощи звуковых команд.

Список источников

1. *Липатников Г. А., Гузеев М. С.* Автоматическое регулирование объектов теплоэнергетики: учеб. пособие, 2007. 136 с.

2. *Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А.* Тепломассообмен. М.: МЭИ, 2005. 550 с.

3. *Першин И. М.* Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск: Рекламно-информационное агентство на КМВ, 2007. 244 с.

УДК. 681.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-234-237**

А. Л. Ляшенко*
кандидат технических наук, доцент
К. Д. Соколова*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИРОПА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГАЗИРОВАННЫХ НАПИТКОВ

Рассмотрена задача поддержания на заданном уровне технологических параметров котла для варки сиропа. В качестве объекта управления представлен котел типа СВК. Разработана математическая модель процессов, протекающих в объекте управления. Произведен расчет настроек регулятор и анализ работы замкнутой системы управления. Рассмотрена реализация проекта в SCADA-системе Trace Mode.
Ключевые слова: *сироповарочный котел, математическая модель, дифференциальные уравнения, синтез, анализ, контроль, диагностика, моделирование, график переходного процесса, распределенный регулятор, SCADA-система.*

A. L. Liashenko*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
K. D. Sokolova*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

AUTOMATION OF THE SYRUP PRODUCTION PROCESS FOR THE PRODUCTION OF CARBONATED DRINKS

The problem of maintaining the technological parameters of a syrup boiler at a given level is considered. A boiler of the SVK type is presented as a control object. A mathematical model of the processes occurring in the control object has been developed. The calculation of the regulator settings and the analysis of the operation of a closed control system were carried out. The implementation of the project in the Trace Mode SCADA system is considered.
Keywords: *syrup boiler, mathematical model, differential equations, synthesis, analysis, control, diagnostics, modeling, transient graph, distributed controller, SCADA system.*

Постановка задачи

Газированные безалкогольные напитки представляют собой водный раствор различных сиропов, плодово-ягодных экстрактов и растительного сырья. Качество напитков напрямую зависит от точности выполнения технологического процесса (ТП). Одним из этапов ТП является приготовление сиропа. Варку сиропа осуществляют в сироповарочных котлах (рис. 1).

Рассмотрим устройство котла [1]. Котел для варки сиропа представляет собой сосуд 1 цилиндрической формы, сформированный двумя корпусами, внешним и внутренним. Данные корпуса образуют паровую рубашку. Через штуцер 2 пар подается в рубашку. Котел оснащен якорной мешалкой 3 с приводом 4. Вода подается в аппарат через патрубок 5. Готовый сироп

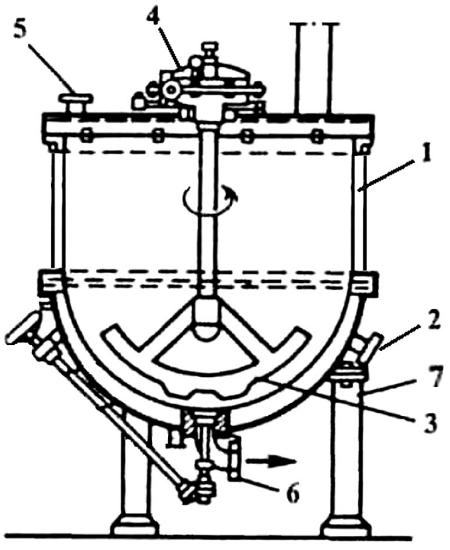


Рис. 1. Сироповарочный котел

спускают через сливную трубу 6. Котел установлен на опорах 7.

Данный котел применяется при производстве сиропа горячим способом, который предусматривает только один режим, а именно кипячение содержимого. Однако при разработке новых технологий приготовления сиропов, возникла потребность в котлах, позволяющих поддерживать различные температурные режимы. В связи с этим предлагается модернизировать данный котел, внести в конструкцию нагревательный элемент (НЭ), разработать систему контроля веса и систему управления для данного этапа ТП с применением SCADA-системы.

Разработка системы управления

Рассмотрим ТП производства сиропа и представим его в виде алгоритма, блок-схема которого представлена на рис. 2.

Для моделирования тепловых процессов в котле была разработана математическая модель (ММ). При составлении ММ применялись уравнения теплопроводности [2]. С помощью полученной ММ был проведен численный эксперимент, по результата которого был произведен расчет настроек регуляторов проектируемой системы управления [3].

Для управления объектом выбрана SCADA-система Trace Mode. В данной SCADA-системе,

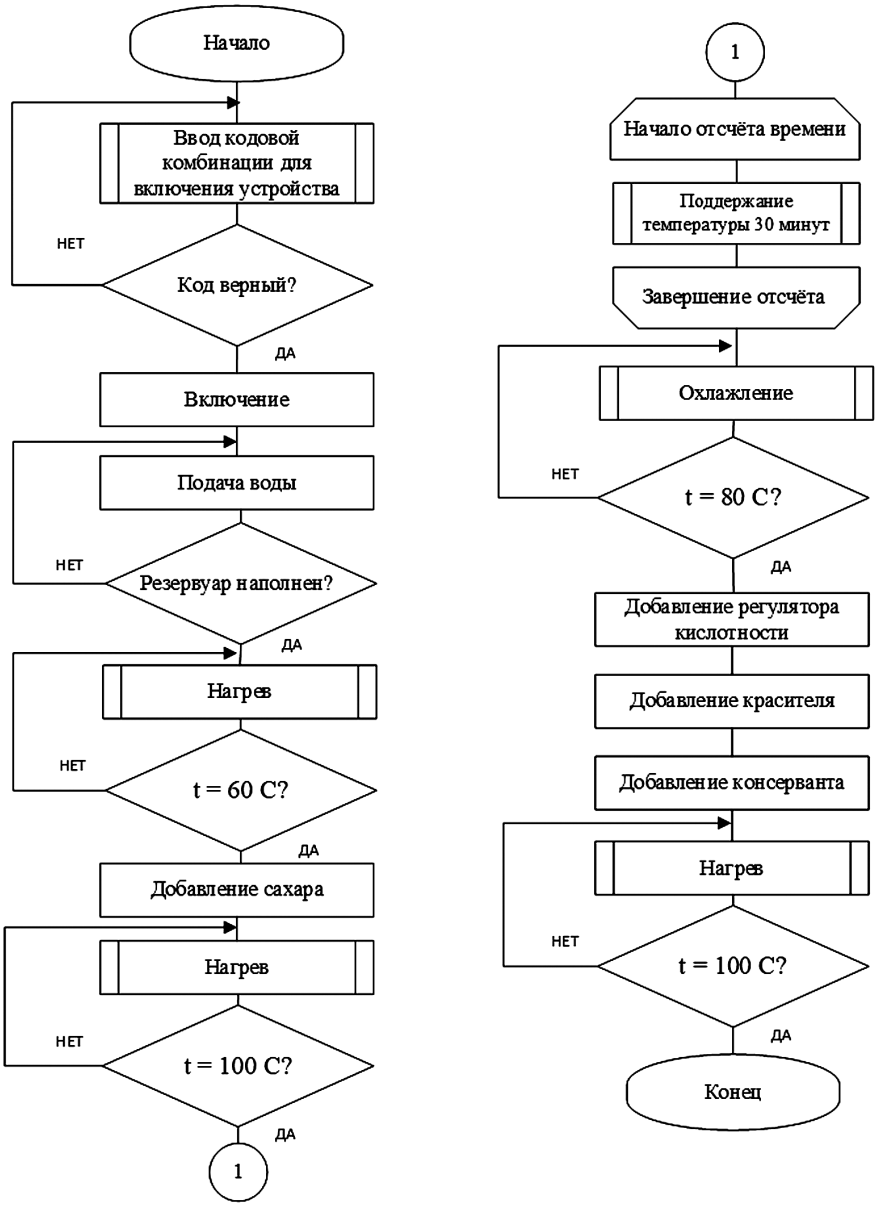


Рис. 2. Блок-схема алгоритма ТП производства сиропа

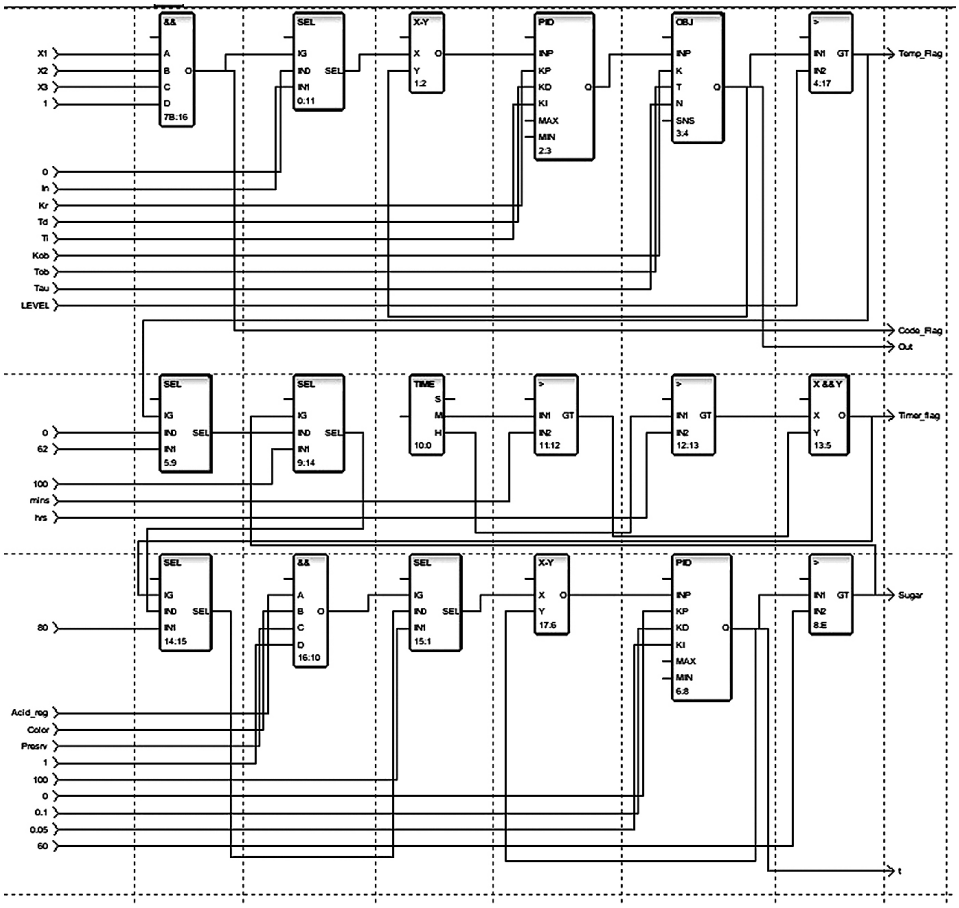


Рис. 3. Программа системы управления

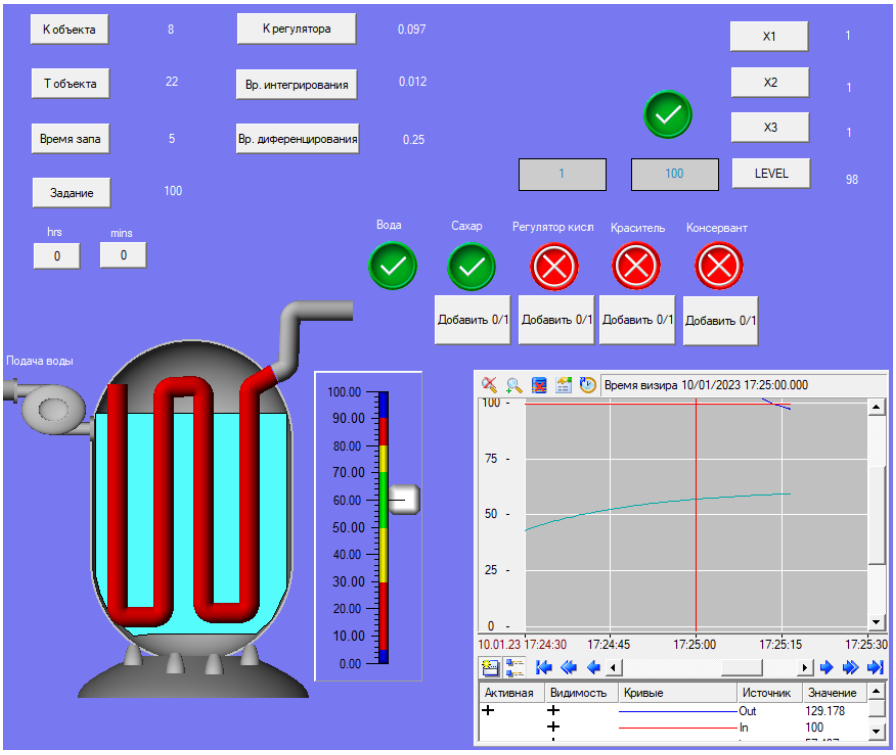


Рис. 4. Фрагмент мнемотабло программы

на основе алгоритма ТП и математической модели, была написана программа, представленная на рис. 3.

Включение системы осуществляется по кодовой комбинации. При вводе комбинации «111», включается индикатор (рис. 4), показывающий, что система готова к работе, начинается подача воды.

После заполнения емкости система контроля веса сигнализирует об этом оператору включением соответствующего индикатора и происходит включение НЭ, температура жидкости в емкости отображается на приборе.

После того как температура воды в резервуаре достигнет 60 °С необходимо добавить сахар. После набора требуемого количества сахара система контроля веса сигнализирует включением соответствующего индикатора.

Дальнейшее функционирование системы осуществляется в соответствии с технологией производства, представленной на рис. 2.

Таким образом, была составлена математическая модель тепловых процессов котла для варки сиропа, на основе которой была разработана система управления, обеспечивающая запуск и останов устройства.

Заключение

В данной работе были решены все поставленные задачи. Составлена математическая модель процесса модель тепловых процессов котла для варки сиропа. На основе полученной модели были произведены расчета настроек регулятора. Моделирование производилось с применением MATLAB Simulink. Система управления была реализована **в** SCADA-системе Trace Mode. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что полученная система может быть использована для управления технологическим процессом.

Список источников

1. *Радионова И. Е.* Технология производства безалкогольных напитков и кваса: учеб. пособие. СПб.: ИТМО, 2015. 105 с.

2. *Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А.* Тепломассообмен. М.: МЭИ, 2005. 550 с.

3. *Першин И. М.* Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск: Рекламно-информационное агентство на КМВ, 2007. 244 с.

УДК 621.316 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-238-246**

О. С. Нуйя*
кандидат технических наук, доцент
А. Б. Бушуев**
кандидат технических наук, доцент
Ю. В. Литвинов*
кандидат технических наук, доцент
В. И. Бойков*
кандидат технических наук, доцент
М. В. Сержантова*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
***Университет ИТМО*

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ РЕКУПЕРАЦИИ

Рекуперация энергии различного типа является актуальной задачей при разработке систем управления электромеханическими устройствами. рациональному и бережному использованию энергоресурсов. Цель данной работы – анализ четырехквадрантных асинхронных электроприводов с векторными частотно-токовыми системами управления и автономными инверторами напряжения с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией на базе IGBT модулей. Рассмотрен алгоритм проектирования и даны результаты моделирования таких систем рекуперации энергии. Предложенная система управления устройством рекуперации может быть использована как составная часть специализированного управляемого электропривода для эскалаторных станций метрополитена, электротранспорта и других электромеханических систем с целью экономии потребляемой энергии.
Ключевые слова: *асинхронный привод, системы управления, рекуперация, IGBT модули, электротранспорт.*

O. S. Nuyya*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. B. Bushuev**
PhD Sc. Tech., Associate Professor
Y. V. Litvinov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
V. I. Boikov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
M. V. Serzhantova*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
***ITMO University*

ANALYSIS OF THE RECOVERY DEVICE MANAGEMENT SYSTEM

Energy recovery of various types is an urgent task in the development of control systems for electromechanical devices. rational and careful use of energy resources. The purpose of this work is to analyze four-quadrant asynchronous electric drives with vector frequency-current control systems and autonomous voltage inverters with sinusoidal pulse-width modulation based on IGBT modules. The design algorithm is considered and the results of modeling of such energy recovery systems are given. The proposed control system of the recovery device can be used as an integral part of a specialized controlled electric drive for escalator stations of the subway, electric transport and other electromechanical systems in order to save energy consumed.
Keywords: *asynchronous drive, control systems, recovery, IGBT modules, electric transport.*

Введение

В связи с развитием «зеленой энергетики» образовалось множество задач по рациональному использованию энергоресурсов. Одним из направлений является рекуперация электрической энергии. Такие задачи очень часто рассматриваются в автомобильной промышленности – электромобили, в городском транспорте (трамваи, троллейбусы). Также много различных за-

дач по рекуперации тепла на предприятиях, домах, например, рекуперация тепла на ТЭЦ. Силовая электроника играет важную роль в управлении и преобразовании современных электроэнергетических систем. В частности, для интеграции различных возобновляемых источников энергии с использованием передач постоянного тока и обеспечения более гибкого регулирования мощности в системах переменного тока были предприняты значительные усилия по модуляции и управлению устройствами силовой электроники. Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) – это хорошо разработанная технология преобразования между источниками питания переменного и постоянного тока, особенно с целью уменьшения гармоник и оптимизации энергопотребления. В качестве фундаментального метода несвязанного управления векторное управление с помощью PI-контроллеров широко используется в энергосистемах. Однако во время работы этих устройств происходят значительные потери мощности, и потери часто рассеиваются в виде тепла, что приводит к значительным затратам на техническое обслуживание. Хотя была проделана большая работа по улучшению конструкции силовой электроники, до сих пор мало внимания уделялось исследованию конструкции контроллера для снижения энергопотребления контроллера (что приводит к потере мощности в силовой электронике) при сохранении приемлемой производительности системы [1]–[5].

Но у нас более узкая задача, в связи с заметно возросшими требованиями к качеству возвращаемой энергии в сеть появилась задача по цифровому управлению устройством рекуперации (инвертором). Необходимость разработки описываемой системы возникла при решении поставленной Комитетом по экономике и промышленной политике Администрации Санкт-Петербурга задачи реконструкции систем управления асинхронными двигателями эскалаторов метрополитена. В связи с возросшими требованиями к качеству возвращаемой энергии в сеть появилась проблема разработки цифровой системы управления устройством рекуперации.

Рассмотрим несколько известных технических решений и проведем небольшой анализ. Чтобы соответствовать более строгим требованиям законодательства по охране окружающей среды и улучшить существующие системы электроснабжения переменного тока, особенно в ветряных электростанциях (Association et al., 2005). Интеграция возобновляемых источников энергии в существующую электрическую сеть выдвинула ряд технических проблем, которые требуют внедрения высоковольтных линий передачи постоянного тока (HVDC), которые потребляют небольшой емкостный ток по сравнению с решения переменного тока высокого напряжения. Преобразователи источника напряжения, работающие в качестве интерфейса между сетью постоянного и переменного тока обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными линейными коммутируемыми преобразователями. Например, преобразователи источника напряжения, использующий высоковольтный IGBT, способны переключаться на более высокой рабочей частоте, а постоянный ток высокого напряжения с использованием преобразователей с питанием от источника напряжения может обеспечивать независимое управление активной и реактивной мощностью, быстрое и обратимое управление потоком мощности и асинхронную развязку с сетями переменного тока.

Используемый метод модуляции для управления силовыми электронными устройствами ШИМ является основополагающим для работы VSC, включая синусоидальную широтно-импульсную модуляцию, пространственно-векторную ШИМ. Многие исследования в основном сосредоточены на проектировании структуры ШИМ для уменьшения потерь мощности во время переключения и на настройке векторного управления для достижения лучших динамических характеристик системы. Хотя частота управления ШИМ может быть оптимизирована для уменьшения потерь мощности, до сих пор мало что было сделано для изучения взаимосвязи между конструкцией параметров векторного управления и снижением потерь мощности, а также того, как конструкция контроллера может помочь уменьшить потери мощности в силовой электронике и в то же время сохранить желаемую производительность системы.

Хорошо известно, что вовремя работы этих устройств происходят значительные потери мощности, и потери часто рассеиваются в виде тепла. Поэтому важно исследовать потери мощности и их связь с работой системы в режиме реального времени и управлением, тем самым определяя правильную конструкцию контроллера, используемого в системе. От выбора и конструкции ПИ-регулятора зависит баланс между потреблением энергии при управлении силовой электроникой и производительностью системы управления, что потенциально приводит к значительной экономии энергии при управлении силовой электроникой для интеграции возобновляемых источников энергии. Это показывает, что это соотношение нелинейно, а улучшенная конструкция контроллера может обеспечить

хороший компромисс между потерей мощности и производительностью системы [10], [11].

VSC модель и векторное управление

На рис. 1 показан стандартный трехфазный инвертор, а на рис. 2 – VSC – инвертор с использованием IGBT-переключателей.

Каждый IGBT работает с противоположным диодом в течение полупериода переменного тока. Коммутационные импульсные сигналы для IGBT обеспечиваются ШИМ-модулятором. Таким образом, основное назначение векторного контроллера можно рассматривать как предоставление ссылки для модулятора.

К основным задачам системы управления инвертором рекуперации относится обеспечение четырехквадратной работы электропривода, в меру энергетических возможностей восстановления симметрии и стандартных параметров промышленной сети в случае наличия в ней искажений. Возможности по улучшению качества промышленной сети ограничены установленной мощностью силового оборудования с энергетическими процессами в приводе. Система управления устройством рекуперации должна быть нечувствительной к гармоническим составляющим напряжения сети, устойчивостью к скачкам и провалам напряжения и обеспечивать слежение за частотой в диапазоне от 48 до 52 Гц. Как дополнительное требование можно рассматривать способность системы удерживать частоту напряжения сети около

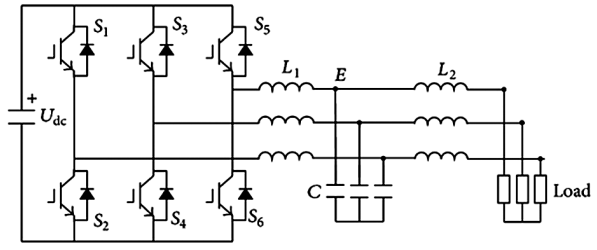


Рис. 1. Трехфазный инвертор

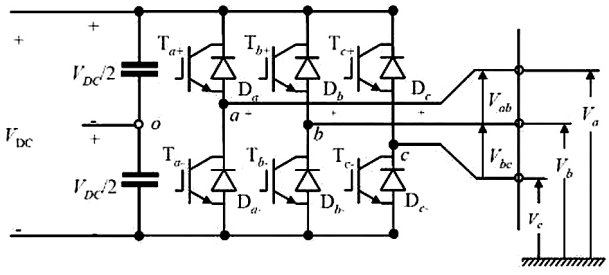


Рис. 2. VSC – инвертор с использованием IGBT-переключателей

стандартных параметров при попадании электроэнергии от первичных источников.

Так как аналого-цифровая система управления обладает жесткой структурой, то ее схемные решения находятся в прямой зависимости от конкретной задачи, решаемой системой.

По степени сложности система управления и составу измерительных устройств задачи могут быть разделены следующим образом:

– просто рекуперация энергии в сеть с целью предупреждения перенапряжения на шинах питания инвертора в генераторном режиме работы электропривода. При этом качество электрической энергии не должно ухудшаться;

– образование локальной электрической сети и поддержание ее параметров в заданных пределах;

– рекуперация электрической энергии в сеть с целью компенсации реактивной мощности в сети.

Наиболее простой системой является первая, так как решаемые ей задачи строго ограничены. В этом случае задача сводится с синхронизации гармонической составляющей напряжения в сети и построению трехфазной системы генераторов тока. В целом задача схожа с задачами, решаемые при построении современных векторных систем управления асинхронными машинами, где регулирование переменных машины осуществляется с помощью трехфазной системы генераторов тока, чья фаза жестко связана с системными переменными. Это позволяет использовать типовые схемотические решения, используемые для систем управления машинами переменного тока [9].

Построение регуляторов тока в неподвижной системе координат обусловлено нелинейностью электрической сети как нагрузки, и изменениями ее параметров в широких пределах из-за непрогнозируемого подключения различных пользователей.

Алгоритм работы данной системы заключается в том, что трехфазный вектор напряжений в сети подается на вход цифро-аналогового преобразователя координат из неподвижной системы во вращающуюся. В случае если результирующий вектор трехфазного напряжения совпадает с осью Y вращающейся системы координат, то для случая симметричной трехфазной сети с одной гармонической составляющей результирующего вектора напряжения на ось X будет равна нулю. Проекция на ось Y в этом случае пропорциональна амплитуде фазного напряжения [12]–[14].

Сигнал выхода преобразователя координат из неподвижной системы во вращающуюся по-

дается на вход ПИ или ПИД-регулятора. Регуляторы обеспечивают требуемый астатизм слежения за положением.

Синтез ПИ-регуляторов по току и напряжению

Выход ПИ-регулятора тока фактически используется для компенсации падения напряжения в линейном резисторе переменного тока и катушки индуктивности. Диапазон параметров ПИ-регулятора ограничен ШИМ-модуляцией в VSC.Если частота переключение ШИМ равна fp, регулятор действует с интервалом Δt=1/10fp. Передаточная функция разомкнутого контура по току с ПИ-регулятором может быть получена с использованием единичной временной задержки ШИМ

$$W(s)=\frac{\left(K_p+K_i/s\right)e^{-1/f_p s}}{R+Ls}, \qquad (1)$$

где $1/f_p s$ – задержка ШИМ.

Аппроксимируем,

$$e^{-1/f_p s}=\frac{-s+2f_p}{s+2f_p}. \qquad (2)$$

С помощью критерия Рауса можно выбрать параметры регулятора тока Kp и Ki.

$$0<K_p<2f_pL+R,$$

$$0<K_i<\frac{\left(2f_pL-K_p+R\right)\left(2TK_p+2TR\right)}{4f_pL-K_p+R}. \qquad (3)$$

Как и в регуляторе тока, в регуляторе напряжения можно выбрать Kp и Ki.

$$0<K_p<2f_iC,$$

$$0<K_i<\frac{2f_iK_p\left(2f_iC-K_p\right)}{4f_iC-K_p}. \qquad (4)$$

После допустимых диапазонов K_p и K_i каждого регулятора, можно найти наилучшее значение K_p и K_i для каждого регулятора, что даст снижение потерь мощности и производительность системы [6].

Принцип работы устройства рекуперации

Аппаратная часть стойки управления цифровым устройством рекуперации практически аналогична аппаратной части стойки управления инвертором электропривода. Основные отличия связаны с программным обеспечением микроконтроллеров системы управления инвертора электропривода и устройства рекуперации. Связь между контроллерами для обеспечения их согласованной работы обеспечивается по последовательному CAN-интерфейсу.

Программное обеспечение микроконтроллера устройства рекуперации, как и микроконтроллера инвертора электропривода, построено по модульному принципу и состоит из основной программы и ряда программных модулей, обеспечивающих различные функции. При этом ряд программных модулей микроконтроллера устройства рекуперации унифицированы с программными модулями микроконтроллера инвертора электропривода.

Алгоритм данной системы заключается в том, что трехфазный вектор напряжений в сети подается на вход преобразователя координат из неподвижной системы во вращающуюся. Если результирующий вектор трехфазного напряжения совпадает с осью *Y* вращающейся системы координат, то для симметричной трехфазной системы с одной гармонической составляющей проекция результирующего вектора напряжения на ось *X* будет равна нулю, а проекция на ось Y пропорциональна амплитуде фазного напряжения.

Во вращающей системе координат формируются сигналы задания тока для фазных регуляторов. В простейшем случае эти сигналы можно получить от регулятора напряжения в звене постоянного тока, реализуя тем самым систему рекуперации, защищающую питание инвертора электропривода от перенапряжения на шинах постоянного тока. При этом составляющая тока по оси *X* задается нулевой, в результате вектор тока в фазах совпадает с вектором фазного напряжения, а реактивная составляющая тока практически отсутствует. Построение регуляторов тока в неподвижной системе координат обусловлено нелинейностью электрической сети как нагрузки, и изменениями ее параметров в широких пределах из-за непрогнозируемого подключения различных пользователей.

Если измерительную систему электропривода дополнить датчиком тока, то после преобразования во вращающую систему координат получаются сигналы, соответствующие активной и реактивной составляющим тока по оси *Y*, и установившейся сигнал задания на его входе равен нулю, получается система компенсаций реактивной составляющей тока. На рис. 3 приведена функциональная схема устройства рекуперации электроэнергии [7], [8].

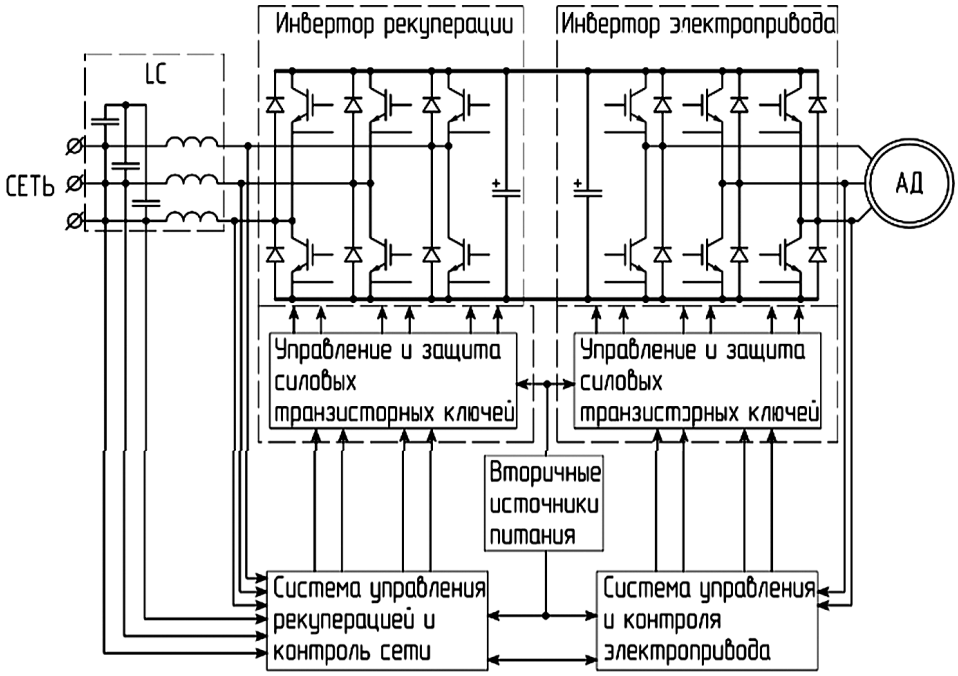


Рис. 3. Функциональная схема устройства рекуперации электроэнергии

Структурная схема системы управления рекуперативного блока показана на рис. 4. Быстродействующая цифровая система векторного управления обеспечивает высокие показатели качества регулирования: рабочий диапазон изменения выходного постоянного напряжения при питании от трехфазной сети 380 В, 50 Гц – от 580 до 650 В; точность поддержания выходного напряжения при отклонениях напряжения питания от –15 % до +10 % и изменении тока нагрузки от холостого хода до $I_{ном}$ – не хуже 5 %; переходное отклонение выходного напряжения в режиме ступенчатого наброса номинальной нагрузки – не более 30 В; время восстановления – не более 50 мс; диапазон изменения установки cosϕ – от 0,7 отстающего до 0,7 опережающего.

Из рис. 3 видно, что программа включает модули преобразования координат (модули Clarke, Inv_Clarke, Parke, INV_Parke), генератор синуса и косинуса (модуль Sin-Cos), пропорционально-интегральные регуляторы напряжения и токов (модуль PI), широтно-импульсный модулятор – ШИМ (модуль PWM). Кроме представленных на структурной схеме модулей:

– модули, обеспечивающие ввод сигналов с внешних устройств;

– модули обмену информацией по последовательному и параллельному портам;

– модули контроля состояния аппаратуры.

Быстродействующая цифровая система векторного управления обеспечивает высокие показатели качества регулирования: рабочий диапазон изменения выходного постоянного напряжения при питании от трехфазной сети 380 В, 50 Гц – от 580 до 650 В; точность поддержания выходного напряжения при отклонениях напряжения питания от –15 % до +10 % и изменении тока нагрузки от холостого хода до $I_{ном}$ – не хуже 5 %; переходное отклонение выходного напряжения в режиме ступенчатого наброса номинальной нагрузки – не более 30 В; время восстановления – не более 50 мс; диапазон изменения установки cosϕ – от 0,7 отстающего до 0,7 опережающего.

Структура системы управления включает два регулятора активной и реактивной составляющих входного тока и регулятор выходного напряжения. На рис.5 приведена структура системы управления рекуперацией электроэнергии в эскалаторах [17], [18], [22].

Моделирование в среде MatLab системы управления устройством рекуперации

Преобразование Кларка использует трехфазные токи i_A, i_B и i_C для того, чтобы вычислить токи в двухфазной ортогональной системе координат статора в осях i_x и i_y. Полученные два тока в неподвижной системе координат статора преобразуются к i_α, i_β составляющим токов в системе координат α-β в соответствии с преобразованием Парка.

С помощью теории автоматического управления выполнили синтез регуляторов вектор-

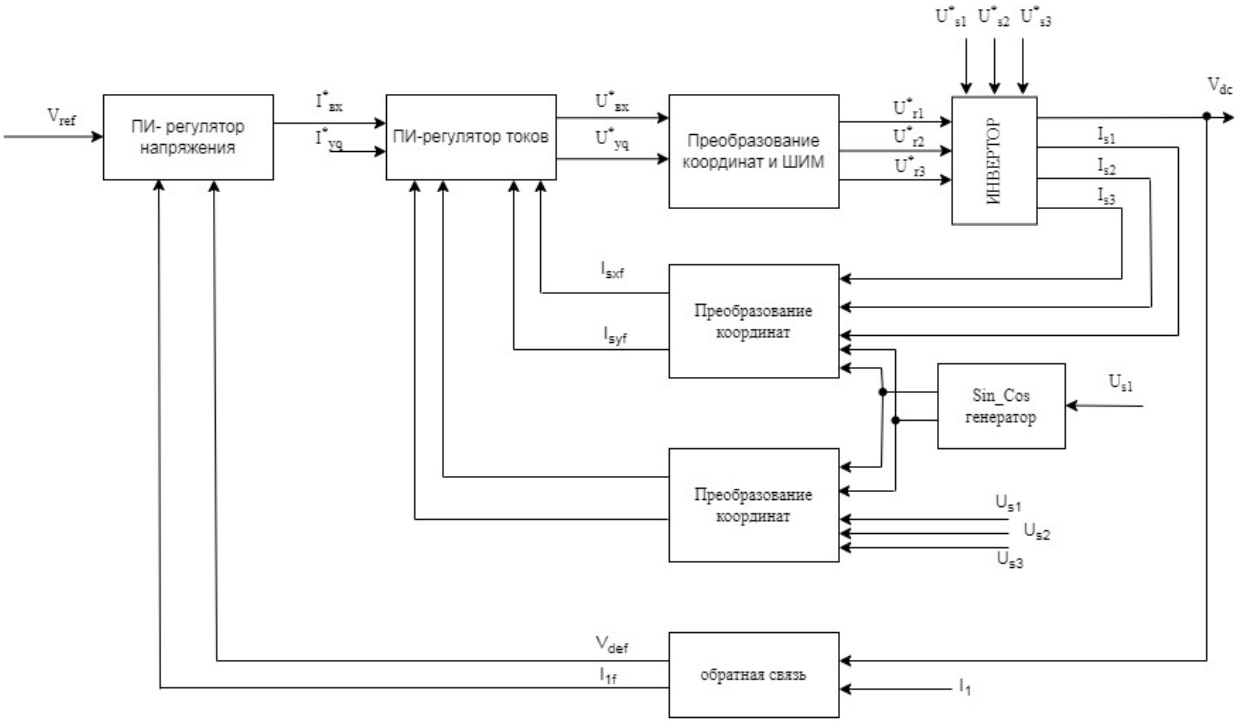


Рис. 4. Структурная схема системы управления рекуперативного блока

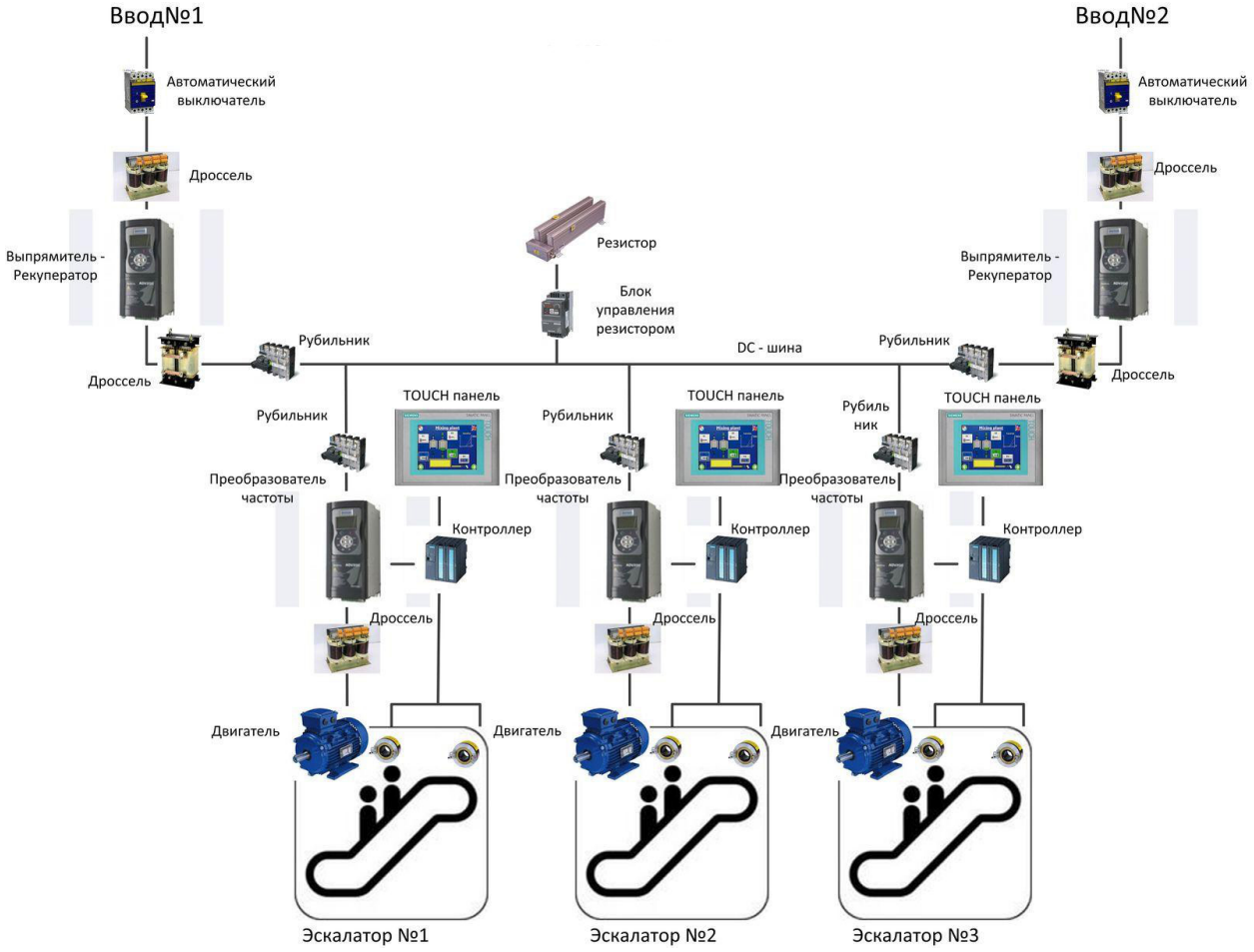


Рис. 5. Система управления рекуперацией электроэнергии в эскалаторах

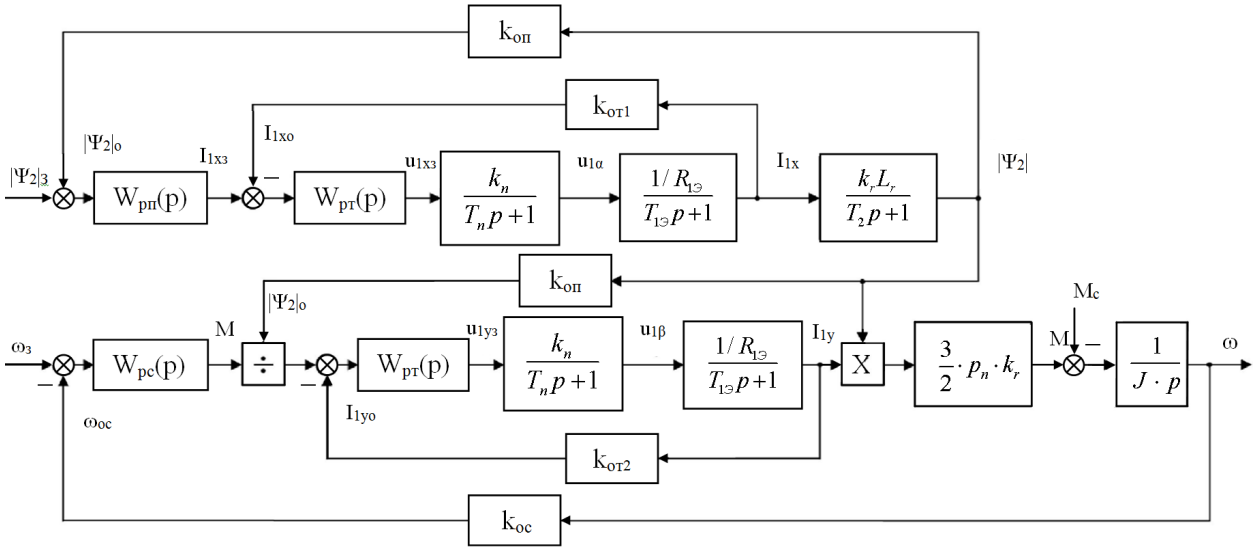


Рис. 6. Математическая модель системы управления устройством рекуперации

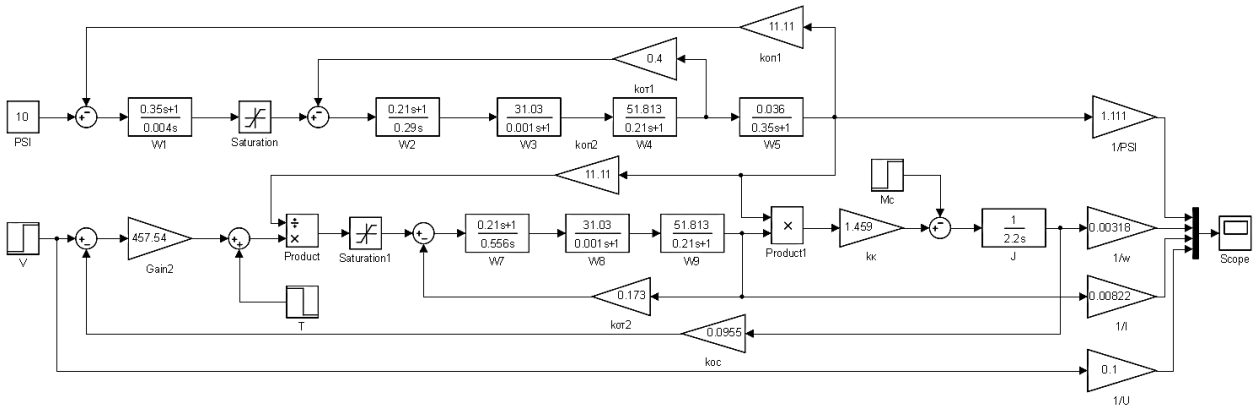


Рис. 7. Математическая модель в среде MatLab

ной системы управления. Математическая модель системы управления устройством рекуперации представлена на рис. 6, математическая модель в среде MatLab на рис. 7.

Обычно при пуске системы управления электроприводом, в составе которой есть преобразователь частоты с векторной системой управления, сначала подается номинальное задание по потокосцеплению. Когда потокосцепление достигает заданного значения, подают задание по скорости и механизм приводится в движение.

При векторной системе управления электроприводом сначала подается номинальное задание по потокосцеплению. Когда потокосцепление достигает заданного значения, подают задание по скорости и механизм приводится в движение. Время переходных процессов для регуляторов: потока τ=1,05 тока τ=0,58 скорости τ=0,53. Для переходных процессов: перерегулирование по току статора δ=4,7 %; перерегулирование по скорости и потоку δ=0.

На рис. 8–11 представлены результаты моделирования.

На рис. 12 приведены примеры возмущающих воздействий типа белый шум.

В научно-исследовательском секторе управляемого электропривода создан и прошел лабораторные испытания опытный образец четырехквадрантного электропривода переменного тока с автономными инверторами напряжения и синусоидальной широтно-импульсной модуляцией на базе IGBT модулей для эскалаторов метрополитена мощностью 200 кВт. Привод представляет собой два одинаковых шкафа, отличие состоит лишь в программном обеспечении системы управления, построенной на основе микропроцессора TMS-320 [6], [7]. Следует отметить, что значительное число программных блоков одинаково. Обмен данными между системами управления устройства рекуперации и электропривода осуществляется по скоростному и помехоустойчивому CAN каналу [19]–[21].

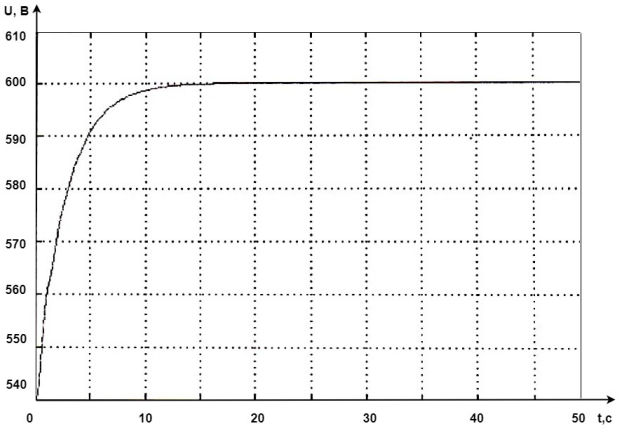


Рис. 8. Переходный процесс аналоговой модели устройства рекуперации при отсутствии возмущающего воздействия

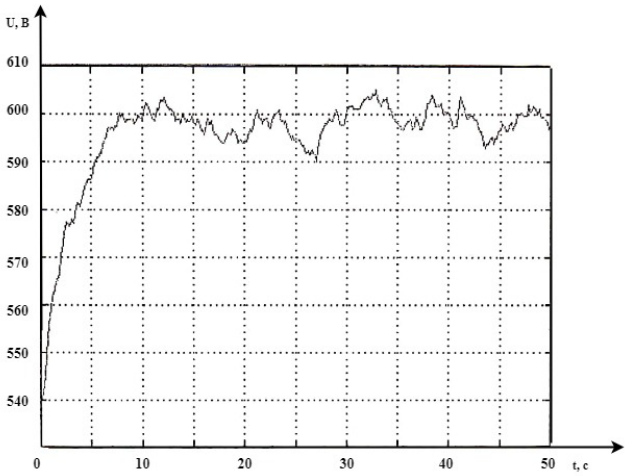


Рис. 10. Переходный процесс аналоговой модели устройства рекуперации при возмущающем воздействии по частоте

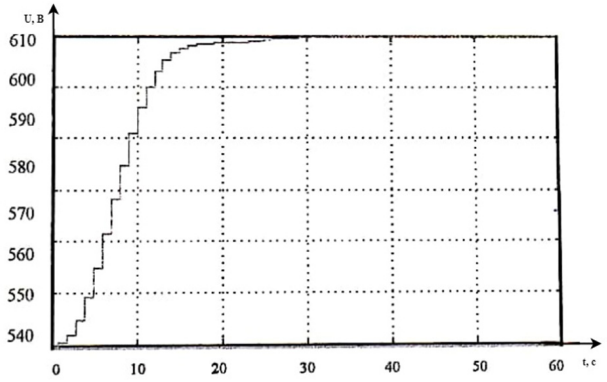


Рис. 9. Переходный процесс дискретной модели устройства рекуперации при отсутствии возмущающего воздействия

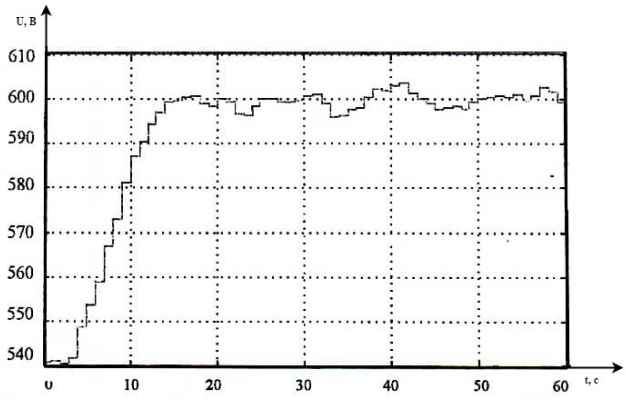


Рис. 11. Переходной процесс дискретной модели устройства рекуперации при возмущающем воздействии по частоте

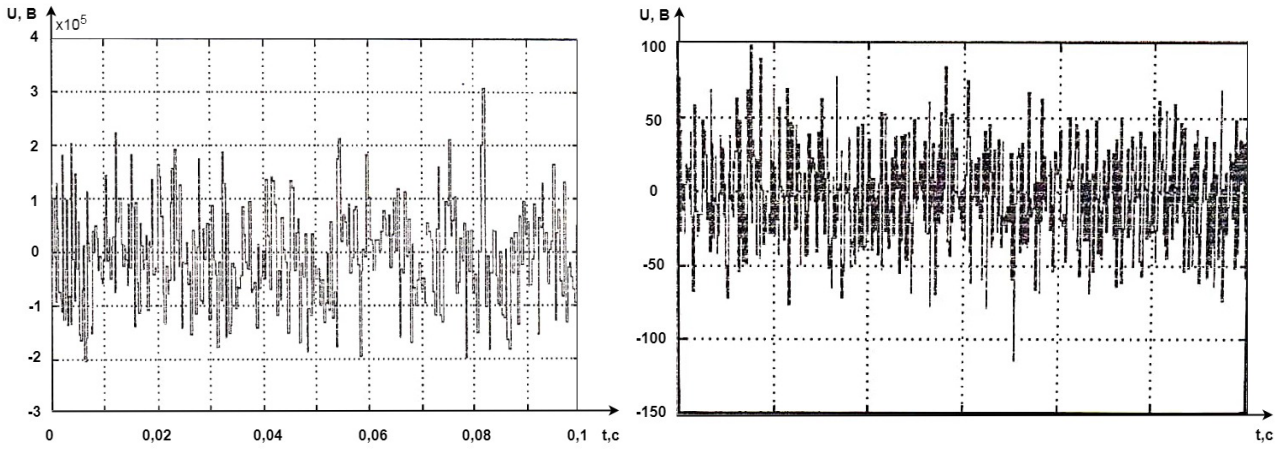


Рис. 12. Примеры частотных возмущающих воздействий

Заключение

В заключение стоит отметить, что устройство рекуперации может использоваться не только совместно с электроприводом, но и как самостоятельное устройство преобразующее постоянное напряжение в трехфазную систему напряжений, а также осуществляющее обратное преобразование трехфазного напряжения в постоянное. При использовании устройства

рекуперации по разным назначениям и в различных режимах требуется модифицировать лишь программное обеспечение, выбирая соответствующие программные модули. При этом аппаратные средства изменяются незначительно.

Система управления устройством рекуперации может быть использована как составная часть специализированного управляемого электропривода для эскалаторных станций метрополитена. Данный подход к разработке систем управления электроприводом может быть использован как для модернизации имеющих эскалаторных станций, так и при построении новых. Также он применим для ресурсосбережения на электромобилях, городском электротранспорте, оборудовании Водоканала и Топливно-энергетического комплекса.

Список источников

1. *Халютина О. С., Харьков В. П.* Рекуперация электрической энергии с использованием электромеханических приводов систем управления Электропитание. 2017. № 2. С. 54–60.

2. *Безъязычный В. Ф., Надеждин И. В., Молчанов А. А.* Быстродействующие загрузочные устройства с рекуперацией энергии для автоматизированных сборочных систем. Справочник // Инженерный журнал. 2017. № 8. С. 11–18.

3. Development of Autonomous Power Supply from Heat Containing Setting for Electric Equipment / K. Romanov, E. Solomin, N. Babak, A. Kovalyov // IEEE Xplore. New York City: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019.

4. *Kodkin V., Anikin A., Baldenkov A.* The analysis of the quality of the frequency control of induction motor carried out on the basis of the processes in the rotor circuit // IOP Conf. Series. Journal of Physics Conference Series. 2017. Vol. 944 (1).

5. *Аникин С. В., Бурковский В. Л., Муконин А. К.* Способ векторного частотного управления асинхронным электроприводом // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 5. С. 98–103.

6. *Zhao X., Li K.* Control Energy Consumption and System Performance in Vector Control of Voltage Source Converters Proceedings of the 19th World Congress The International Federation of Automatic Control Cape Town, South Africa. August 24–29, 2014.

7. *Баев А. П., Гончаренко М. Р., Исаков А. С.* Векторная система управления устройством рекуперации на микропроцессоре TMS320F243. 2002. Т. 2. Вып.

8. *Баев А. П., Гончаренко М. Р., Исаков А. С.* Особенности проектирования четырехквадрантных асинхронных электроприводов // Научно-технический вестник СПб ГИТМО(ТУ). 2004. Вып. 14.

9. *Bimal K.* Modern power electronics and ac drives, 2002 Prentice Hall PTR, Prentice-Hall, Inc. P. 307–331.

10. *Leonharn W.* Control of electrical drives, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York; Tokyo, 1985. P. 245–259.

11. *Krishnan R.* Electric motor drives modeling analysis and control, 2001 Prentice Hall, Prentice-Hall, Inc. 2009. Vol. 1. P. 282–308.

12. *Mohand N.* Power Electronics: Converters, Applications, and Design, John Wiley & Sons, 3rd edition. 2013.Vol. 34. P. 326–340.

13. *Geyer R., Knöttner S., Diendorfer C.* 100 % renewable energy for Austria's industry: alternative energy sources and infrastructure requirements // Eceee industrial summer study proceedings. 2020. P. 395–40.

14. *Tunyasrirut S., Yamamoto Y.* A DSP-based modified slip energy recovery drive using a 12-pulse converter and shunt chopper for a speed control system of a wound rotor induction motor. ElectricPower Systems Research. 2008. Vol. 78. Issue 5. P. 861–872.

15. *Ram S., Rahi O., Sharma V.* A comprehensive literature review on slip power recovery drives Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 73. P. 922–934.

16. *Ram S., Rahi O., Sharma V.* Performance analysis of SPRS-based induction motor drive using multi-level inverter and buck-boost chopper Published Online. 2020. P. 85–100.

17. *Faiz J.* Harmonic analysis and performance improvement of slip energy recovery induction motor drives. IEEE Trans. Power Electron. 2001.

18. *González A., Palacin R., Batty P.* Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. Energy Conversion and Management. 2013. Vol. 75. P. 374–388.

19. *Carrillo C., Díaz-Dorado E., Cidrás J.* A methodology for energy analysis of escalators. Energy and Buildings. 2013. Vol. 61. P. 21–30.

20. *Tunyasrirut S., Charumit C.* Grid Connected based PWM Converter Applied a Self-excited Induction Generator for Wind Turbine Applications. Energy Procedia. 2014. Vol. 56. P. 342–351.

21. *Rusong W., Dewan S., Slemon G.* PWM AC to DC converter with fixed switching frequency // IEEE Trans. Ind. Appl. 1990. Vol. 26. N 5 P. 880–885.

22. Сайт компании «Электротехнические системы Петербург» / Рекуператоры электроэнергии. URL: http://esspb.ru/Documents/FR-A741_invertor.pdf (дата обращения: 15.01.2023).

УДК 621.01 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-247-250**

М. В. Сержантова*
кандидат технических наук, доцент
В. И. Бойков*
кандидат технических наук, доцент
Р. В. Рудаков*
аспирант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассмотрена задача идентификации манипуляционных робототехнических систем на основе теоремы идентифицируемости для класса линейной непрерывных стационарных динамических систем. Для решения поставленной задачи применен следующий подход – идентификация на скользящих режимах. Новизна состоит в применении полученных результатов для построения управления адаптивными многозвенных манипуляционных робототехническими системами в скользящем режиме. В скользящем режиме используется релейное управление, частота переключения которого стремится к бесконечности, при этом управление ограничено и соответствует возможностям техники.
Ключевые слова: *уравнение Лагранжа, многозвенные объекты, идентификация объекта, манипуляционные робототехнические системы, адаптивные манипуляционные робототехнические системы, адаптивность, неоднородные системы.*

M. V. Serzhantova*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
V. I. Boikov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
R. V. Rudakov*
PhD Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

INVESTIGATION OF THE PROBLEM OF IDENTIFICATION OF MANIPULATIVE ROBOTIC SYSTEMS

The problem of identification of manipulative robotic systems is considered on the basis of the identifiability theorem for the class of linear continuous stationary dynamical systems. To solve the problem, the following approach is applied – identification on sliding modes. The novelty lies in the application of the obtained results to the construction of the control of adaptive multilink manipulation robotic systems in a sliding mode. In sliding mode, relay control is used, the switching frequency of which tends to infinity, while the control is limited and corresponds to the capabilities of technology.
Keywords: *Lagrange equation, multilink objects, object identification, manipulative robotic systems, adaptive manipulative robotic systems, adaptability, heterogeneous systems.*

Адаптивность является наиболее важным параметром любой робототехнической системы, что позволяет управлять робототехническими системами в различных ситуациях и получать соответствующий отклик. Чтобы получить адаптивную модель робототехнической системы нужно проверить является ли система идентифицируемой.

Линейная система называется полностью идентифицируемой по вектору состояния, если при заданном векторе начальных условий x0 матрица параметров A может быть однозначно восстановлена за конечный отрезок времени идентификации по одной временной последовательности x= x(t).

Иначе пара (A, x0) полностью идентифицируема или идентифицируема вполне, когда множество пар (A, x0), объединенных общностью интегральной кривой x= x(t), x0=x(0), вырождается в точку A=A.

В противном случае указанная пара неидентифицируема. Критерий параметрической идентифицируемости напоминает критерии управляемости и наблюдаемости.

В статье решается проблема идентификации объектов. Исследуемым объектом является – однозвенный манипулятор с грузом. Требуется установить является объект идентифицируемыми на основе уравнения Лагранжа и теоремы идентифицируемости для неоднородных динамических линейных объектов.

Система уравнений Лагранжа второго рода позволяет описать динамику механической системы с геометрическими связями, независимо от того, какое количество точек или тел входят в систему, как движутся тела и какое движение рассматривается.

Использование уравнений Лагранжа второго рода является универсальным методом составления дифференциальных уравнений движения материальных систем.

Обобщенными координатами материальной системы называются те параметры, которые не имеют связей между собой, полностью определяющие ее положение, то есть однозначно определяющие положение каждой точки системы.

Для вывода уравнений движений робота в обобщенных координатах используем уравнение Лагранжа второго рода [3]

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) - \left(\frac{\partial T}{\partial q_i}\right) = Q_i, \qquad (1)$$

где $T(q_i, \dot{q}_i, t)$ – кинетическая энергия системы; q_i обобщенные координаты; Q_i – обобщенная сила. Отметим, что уравнение (1) описывает движение механической системы, подчиненной идеальным связям.

Идеальными называются связи, сумма элементарных работ которых на любых виртуальных перемещениях точек системы равна нулю, то есть

$$\sum_{k=1}^{n} \vec{R}_k * \partial \vec{r}_k$$

где $\vec{R}_k$ – равнодействующая всех сил реакций связей, действующих на k-ю точку; $\delta\vec{r}_k$ – виртуальное перемещение k-й точки; n – число материальных точек в данной системе.

Отметим, что данное соотношение, которое служит определением идеальных связей, должно выполняться для всех виртуальных перемещений системы. Идеальными связями являются: абсолютно гладкие поверхности и линии, жесткие стержни, абсолютно твердые тела, шарниры без трения, гибкие связи типа нитей, канатов, тросов и т. п. Идеальной связью также может быть абсолютно твердая шероховатая поверхность при качении без скольжения по ней абсолютно твердого тела.

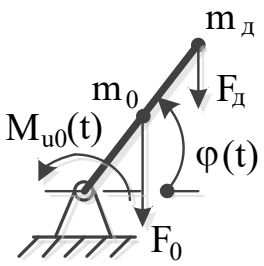


Рис. 1. Модель однозвенного робота

Рассмотрим исследуемый объект. Объект, представленный на рис. 1 – однозвенный манипуляционный робот, состоящий из звена длиной L_0 и массой m_0. Под действием внешнего управляющего момента $M_{u0}(t)$ звено поворачивается на угол $\varphi(t)$, который выберем в качестве обобщенной координаты. Предположим, что робот переносит деталь массой $m_д$, величину которой будем считать неизвестной, но постоянной. При изменении угла поворота меняются силы веса F_0 и $F_д$, которые отнесем к внешним возмущениям.

Для упрощения уравнений модели звено робота будем считать тонким абсолютно жестким стержнем, масса которого сосредоточена в его центре (центр масс). Момент инерции такого звена относительно шарнира составит $J_0 = m_0 L_0^2/4$. Наличие переносимой детали увеличит момент инерции на величину $J_д = m_д L_0^2$.

На звено действует вращающий момент $M_{u0}(t)$ – входное управляющее воздействие, а также моменты, вызванные действием сил тяжести. Кроме того, будем считать, что в опоре создается сила вязкого трения. В результате выражение для обобщенной силы принимает вид

$$Q(t) = M_{u0}(t) - \left(\frac{m_0}{2} + m_д\right) g L_0 \cos\varphi(t) - K_0 \dot{\varphi}(t),$$

где K_0 – коэффициент вязкого трения; g – ускорение свободного падения; $F_0 = \frac{m_0}{2} g L_0 \cos\varphi(t)$ – вращающий момент, вызванный наличием массы m_0; $F_\partial = m_\partial g L_0 \cos\varphi(t)$ – вращающий момент, вызванный наличием массы $m_д$.

Звено вращается вокруг неподвижной оси с угловой скоростью $\dot{\varphi}$, следовательно, его кинетическая энергия будет равна

$$T = \frac{((J_0 + J_\partial)\dot{\varphi}^2)}{2}.$$

После подстановки уравнение (1) принимает вид

$$(J_0 + J_д)\ddot{\varphi}(t) + K_0\dot{\varphi}(t) + \\ +(\frac{m_0}{2} + m_д)gL_0\cos\varphi(t) = M_{u0}(t). \quad (2)$$

В результате получили нелинейное уравнение второго порядка движения однозвенного манипуляционного робота, параметры которого зависят от массы $m_д$ переносимой детали и поэтому априорно неизвестны.

Уравнение (2) можно линеаризовать. Так, если звено робота находится в положении φ_0, то при малых отклонениях угла от этого положения получаем

$$\varphi(t)=\varphi_p+\Delta\varphi(t);$$
$$(J_0 + J_д)\Delta\ddot{\varphi}(t) + K_0\Delta\dot{\varphi}(t) + \\ +(m_0/2 + m_д)(gL_0\cos(\varphi_p)\Delta\varphi(t)) = \\ = M_{u0}(t) - (m_0/2 + m_д)gL_0\sin(\varphi_p). \quad (3)$$

Отметим, что в линеаризованном уравнении (3) кроме неизвестных параметров, аналогичных коэффициентам уравнения (2), появляется априорно неизвестное внешнее возмущение по входу системы

$$Q_0 = (m_0/2 + m_д)gL_0\sin(\varphi_p).$$

Введя обозначения

$$x_1(t) = \Delta\varphi(t) \text{ и } x_2(t) = \dot{x}_1(t),$$

запишем уравнение (3) в матричном виде

$$\dot{X}(t) = AX(t) + B(M_{u0}(t) - \\ -(\frac{m_0}{2} + m_д)gL_0\sin(j_p)), \quad (4)$$

$$\varphi(t)=CX(t),$$

где $X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$ – вектор состояния;

$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -c_1 & -c_2 \end{bmatrix}$ – матрица системы с параметрами $c_1 = \frac{((\frac{m_0}{2} + m_д)gL_0\cos(\varphi_p))}{(J_0 + J_д)}$ и $c_2 = \frac{K_0}{(J_0 + J_\partial)}$

$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \hline \frac{1}{J_0 + J_д} \end{bmatrix}$ – матрица входа; C= [1 0]– матрица выхода.

В полученной системе уравнений (4) три неизвестных параметра. Для их вычисления требуется измерение компонент вектора состояния – угла поворота звена и величины угловой скорости. Отметим также, что ранг матрицы управляемости

$$rank\ R_u = rank[B \quad AB] = 2,$$

то есть линеаризованная система полностью управляемая. Ранг матрицы наблюдаемости

$$rank\ R_\varphi = rank[\begin{matrix} C \\ CA \end{matrix}] = 2,$$

то есть линеаризованная система полностью наблюдаемая. Ранг матрицы идентифицируемости зависит от значений измеряемых компонент вектора состояния [] и в случае, когда начальное значение компоненты $x_2 \neq 0$

$$rank\ R_1 = rank[X \quad AX] = 2,$$

то есть система идентифицируемая. Очевидно, что в случае неподвижности звена, когда внешний управляющий момент $M_{u0}(t)$ уравновешивает действие сил тяжести, система неидентифицируема.

Задаче оценки внешнего возмущающего воздействия в настоящее время уделяется огромное внимание. Для оценки внешних возмущений используют специальные наблюдатели. В частности, показано, что для полностью управляемой и наблюдаемой системы для синтеза наблюдателей возмущений можно использовать любой метод проектирования регуляторов с обратной связью [1].

Заключение

В работе решена задача идентификации манипуляционных робототехнических систем на основе теоремы идентифицируемости для класса линейных непрерывных стационарных динамических систем. Установлено, что объекты являются идентифицируемыми. Подтверждением чему является наличие при заданном векторе начальных условий x_0 входного сигнала, при котором матрицы ее параметров A и B могут быть однозначно восстановлены за конечный отрезок времени идентификации по одной временной последовательности $x = x(t)$. Поставленная задача решена и пара ((A,B), x0) полностью идентифицируема или идентифицируема вполне, когда множество пар ((A,B), x_0), объединенных общностью интегральной кривой $x = x(t)$, $x_0 = x(0)$, вырождается в точку A=A, B=B.

Список источников

1. *Балонин Н. А.* Теоремы идентифицируемости. СПб.: Политехника, 2010. С. 45.

2. *Андриевский Б. Р., Фуртат И. Б.* Наблюдатели возмущений: методы и приложения // Автоматика и телемеханика. 2020. № 9.

3. *Колюбин С. А.* Динамика робототехнических систем: учеб. пособие. СПб.: ИТМО, 2017. 117 с.

4. *Бобцов А. А., Никифоров В. О., Пыркин А. А.* Методы адаптивного и робастного управления нелинейными объектами в приборостроении, 2013. С. 245.

5. *Трешин В. Г.* Уравнения лагранжа второго рода, их приложения к механическим и электромеханическим системам. Уфа 2006. С. 155.

УДК 681.5.01 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-251-256**

М. В. Сержантова*
кандидат технических наук, доцент
С. А. Сериков*
доктор технических наук, доцент
Г. К. Григорьев*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МУЛЬТИРОТОРНОГО БЕСПИЛОТНИКА, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕГО В СОСТАВЕ ГРУППЫ, И ВОЗМОЖНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОПТИМИЗАЦИИ МАРТС

В настоящее время роботы и МАРТС получают все более широкое распространение в различных сферах человеческой деятельности, позволяя автоматизировать ряд трудоемких задач. Цель данной работы – анализ существующих групповых систем управления, применяемых для объединения беспилотников. Рассмотрена математическая модель отдельного мультироторного беспилотника и представлены уравнения, описывающие движение каждого отдельного агента МАРТС. Предложен подход к оптимизации параметров полета и группового управления для группы БПЛА.
Ключевые слова: *беспилотник, мультиагентные робототехнические системы, системы группового управления, оптимизация, математическая модель квадрокоптера.*

M. V. Serzhantova*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
S. A. Serikov*
Dr. Sc. Tech., Associate Professor
G. K .Grigorev*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

MATHEMATICAL MODEL OF MULTIROTOR DRONE AS A PART OF GROUP AND OPTIMIZATION PARAMETERS OF MRS

This paper explores the problem of group control systems used for drone groups. In this research are presented mathematical models of a separate multirotor drone and describing the movement of each individual agent of MRS are presented, proposed an approach to optimizing flight parameters and group control parameters for a group of UAVs.
Keywords: *UAV, multi-agent robotic systems, group management systems, optimization, quadcopter mathematical model.*

В современной практике применения робототехнических систем (РТС) для выполнения поставленных задач мощностей отдельно взятого робота зачастую оказывается недостаточно. Спектр задач, решаемых РТС крайне широк: от тушения пожаров и осуществления съемок местности до сборки объектов в условиях космоса. При решении этих и подобных задач возможно достижение качественно лучшего результата при использовании объединении роботов. В таком случае формируется мультиагентная робототехническая система (МАРТС) и, соответственно, решать задачи взаимодействия роботов и их функционирования приходится системе группового управления.

Существует множество преимуществ данного подхода к решению масштабных задач. К ним можно отнести охват больших территорий за меньшее время по сравнению с одиночными автономными роботами. Наиболее ценным свойством роботов, работающих в группе, является общая отказоустойчивость системы и высокая вероятность достижения целей, поставленных перед МАРТС. Данное свойство достигается за счет перераспределения ролей между роботами в случае выхода из строя одной или нескольких единиц группы [1].

Образование групп широко распространено в животном мире. Функционирование в объединениях, таких как стада, стада, косяки и т. д.,

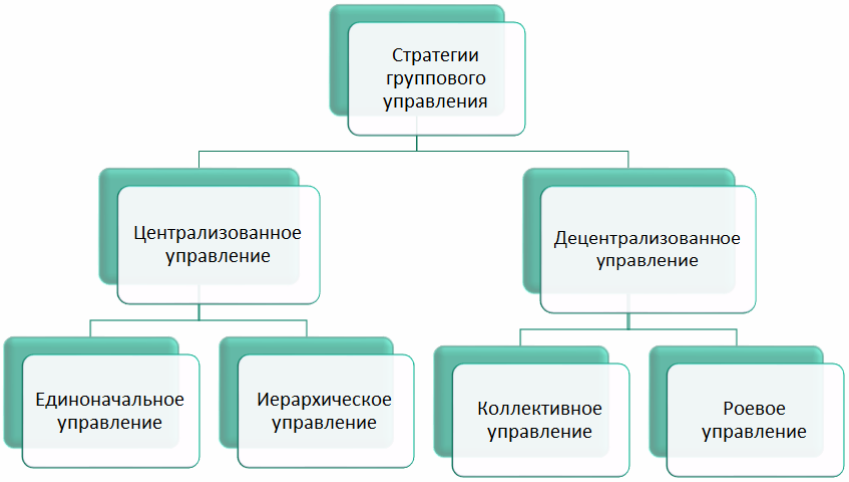


Рис. 1. Стратегии группового управления РТС

дает безусловные преимущества отдельным членам группы. На протяжении многих лет все большее внимание уделяется пониманию природы этих коллективных движений не только биологами, но и робототехниками [2]. Для совместного достижения общих целей в задачах, предполагающих автономное функционирование в течение продолжительного времени или выполнение работ в агрессивных средах роботы могут объединяться в МАРТС. При этом возникают проблемы группового управления и коммуникации, связанные с организацией «коллективного» поведения роботов [3].

Существует несколько подходов к реализации группового управления, анализируя различные источники можно осуществить деление на различные стратегии управления (рис. 1).

Глобально системы управления МАРТС делятся на два типа: централизованное и децентрализованное управление. Рассматривая централизованные системы, следует выделять два основных класса стратегий – единоначального и иерархического управления. Единоначальное централизованное управление подразумевает, что управление всем объединением осуществляется центральным командным блоком или же в группе присутствует некоторый лидирующий агент. Очевидным преимуществом данной системы является сравнительная простота организации и алгоритмизации, поскольку сигналы и команды отправляются подчиненным агентам непосредственно от управляющего. В случае иерархичного управления сигналы и команды распределяются по некоторой установленной иерархии.

Если говорить о децентрализованных системах управления, то к основным преимуществам стоит отнести высокую выживаемость системв, поскольку каждый член системы управляет своими действиями независимо от центрального устройства, в случае поломки какого-либо участника МАРТС продолжит функционировать и сможет взять на себя его схожие задачи. При этом высокая живучесть группы достигается без каких-либо дополнительных затрат, а только лишь за счет самой децентрализованной организации группового управления [4]. Зачастую задача, решаемая отдельным участником децентрализованной системы не сложная, так как робот предназначен для выполнении и оптимизации только своих действий.

Гибридная система представляет из себя нечто среднее между двумя вышеописанными стратегиями, в которых декомпозиция глобальной задачи выполняется за счет обмена информацией между агентами, а обработка данных осуществляется управляющим центром [5]. Существенные особенности, преимущества и недостатки разных систем управления приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ рассмотренных типов управления в МАРТС

Характеристика	Тип системы		
	Централизованная	Децентрализованная	Гибридная
Надежность	–	+	+
Быстродействие	–	–	+
Самоорганизация	–	+	+
Наилучшие варианты распределения	+	–	–
Расход вычислительных реусров	+	–	+

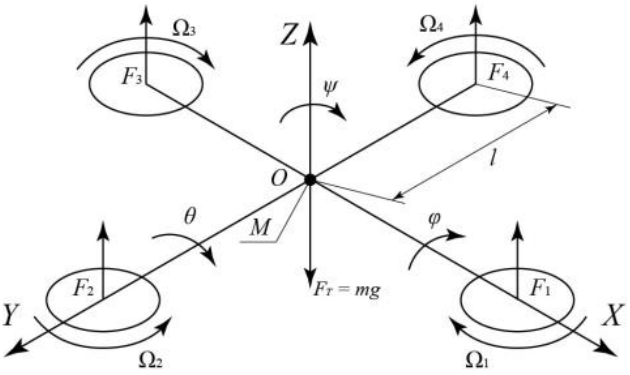


Рис. 2. Схема перемещения квадрокоптера в пространстве

Для решения последующих задач оптимизации движения, управления, положения беспилотника необходимо осуществлять расчеты и моделирование, а для этого потребуется математическая модель как отдельного беспилотного летательного аппарата (БПЛА), так и их совокупности. Математическая модель МАРТС строится на основе рассмотрения поведения одного отдельного дрона. Он является разновидностью летательного аппарата с вертикальным вектором тяги, приводящимся в движение четырьмя роторами со скоростью вращения Ω_1, Ω_2, Ω_3, Ω_4, закрепленных в центре масс робота M на двух пересекающихся крест-накрест металлических балках, вращающихся диагонально в противоположных направлениях (рис. 2).

Положение центра масс квадрокоптера выражается в инерциальной системе отсчета как $\varepsilon=[X\ Y\ Z]^T$. Ориентация или угловое положение определяется в инерциальной системе отсчета с помощью углов Эйлера «крен-тангаж-рыскание» $\eta=[\Phi\ \theta\ \Psi]^T$. Линейные скорости $V_B=[V_X\ V_Y\ V_Z]^T$ и угловые скорости $\nu=[P\ Q\ R]^T$.

Для описания положения квадрокоптера относительно неподвижной системы координат используется углы Эйлера и вектор R. Поворот тела вокруг декартовых осей координат в трехмерном пространстве может быть представлен в виде ZYX-преобразования

$$R = \begin{pmatrix} \cos\varphi\cos\theta & \cos\varphi\sin\theta\sin\psi - \cos\psi\sin\varphi & \cos\varphi\sin\theta\cos\psi + \sin\varphi\sin\psi \\ \sin\varphi\cos\theta & \sin\varphi\sin\theta\sin\psi + \cos\varphi\cos\psi & \sin\varphi\sin\theta\cos\psi - \cos\varphi\sin\psi \\ -\sin\varphi & \cos\theta\sin\psi & \cos\theta\cos\psi \end{pmatrix},$$

Поскольку двигатели беспилотника принимаются идентичными, вывод объясняется для одного из них. Тяга, создаваемая одним пропеллером, определяется следующим образом:

$$T_i = C_D w_i^2 Apr,$$

где C_D – коэффициент тяги двигателя; ρ – плотность воздуха; A – площадь поперечного сечения вращения пропеллера; r – радиус ротора; w_i – угловая скорость ротора.

Для простого движения в полете рассматривается подход с сосредоточенными параметрами, упрощающий приведенное выше уравнение

$$T_i = K w_i^2.$$

Объединяя тягу от всех четырех пропеллеров, суммарная тяга в направлении определяется по формуле

$$T_i = K \sum w_i^2.$$

Следовательно, суммарная тяга, действующая на квадрокоптер в раме корпуса, равна

$$F^B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & T \end{bmatrix}^T.$$

В дополнение к тяге на квадрокоптер также действует сила сопротивления, которая является силой сопротивления. Он имеет компоненты вдоль осей координат в инерциальной системе отсчета, прямо пропорциональные соответствующим скоростям. Сила сопротивления задается в компонентной форме как

$$F^D = \begin{bmatrix} A_x & 0 & 0 \\ 0 & A_y & 0 \\ 0 & 0 & Az \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix},$$

где A_x, A_y и A_z – коэффициенты лобового сопротивления в направлениях x, y, z.

Беспилотник может осуществлять три вида движения в вертикальной плоскости: зависать, подниматься или опускаться. Если все скорости вращения роторов равны, квадрокоптер будет перемещаться по оси O_z: двигаться вверх, зависать или падать вниз в зависимости от величины силы относительно силы тяжести. Очевидно, что при зависании тяга на всех пропеллерах суммарно равна силе земного притяжения. При подъеме вверх поступают сигналы управления и роторы увеличивают скорость своего вращения, тем самым увеличивая силу тяги, которая становится больше силы притяжения. В случае спуска осуществляется снижение скорости вращение винтов, из-за чего под действием силы тяжести дрон начинает двигаться вниз.

Моменты, действующие на квадрокоптер, вызывают движение по тангажу, крену и рысканию. Момент качения M_Φ возникает из-за разницы в тяге, создаваемой двигателями 2 и 4. Момент качения M_θ возникает из-за разницы в тяге, создаваемой двигателями 1 и 3.

При описании движения БПЛА в пространстве почти всегда используются термины: рыскание, тангаж, крен. Рыскание – поворот вправо или влево (вращения) вокруг оси *Oz*. Тангаж – движение квадрокоптера вперед или назад. Достигается увеличением тяги на передних или задних пропеллерах. И, наконец, крен является поворотом или наклоном квадрокоптера вокруг его продольной оси, будто он заваливается на бок.

Для движения вперед происходит уменьшение скорости вращения передних пропеллеров и увеличение скорости вращения задних. Общая сила тяги останется равной весу, поэтому дрон останется на том же вертикальном уровне

$$M_\Phi = L(T_4 - T_2),$$

$$M_\theta = L(T_3 - T_1),$$

в котором L – расстояние между центром пропеллера и центром квадрокоптера.

Момент рыскания M_ψ вызван силой сопротивления, действующей на все пропеллеры и противодействующей их вращению

$$M_\psi = B(-w_1^2 + w_2^2 - w_3^2 + w_4^2).$$

Вращательный момент, действующий на квадрокоптер в раме корпуса, равен

$$M^B = \begin{bmatrix} M_\Phi & M_\theta & M_\psi \end{bmatrix}^T.$$

Формулировка Ньютона – Эйлера используется для вывода динамических уравнений движения квадрокоптера.

Предполагается, что квадрокоптер имеет симметричную структуру, поэтому матрица инерции диагональна и не зависит от времени, с I_{XX}=I_{YY}

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix}.$$

Скорость изменения линейного перемещения из одного положения в другое связана с угловой скоростью и разницей в угле, которая приведет к изменению положения выходного сигнала системы *x, y, z*. Это изменение может быть вычислено с использованием угловых скоростей, измеренных датчиком квадрокоптера (*P, Q, R*) [6]

$$\begin{bmatrix} \dot{\Phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\Phi\tan\theta & \cos\Phi\tan\theta \\ 0 & \cos\Phi & \sin\Phi \\ 0 & \dfrac{\cos\Phi}{\cos\theta} & \dfrac{\cos\Phi}{\cos\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \\ R \end{bmatrix}.$$

Используя уравнение тяги и крутящего момента, упомянутое в динамике квадрокоптера, четыре уравнения тяги и крутящих моментов, получены значения угловых скоростей на каждом из четырех роторов и показаны в уравнении

$$\begin{bmatrix} T \\ M_\Phi \\ M_\theta \\ M_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & K & K & K \\ 0 & KL & 0 & -KL \\ -KL & 0 & KL & 0 \\ -B & B & -B & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1^2 \\ w_2^2 \\ w_3^2 \\ w_4^2 \end{bmatrix}.$$

Принимая обратную приведенную выше матрицу, получаются следующие уравнения для отдельных скоростей вращения ротора

$$w_1^2 = \frac{T}{4K} - \frac{M_\theta}{2KL} - \frac{M_\psi}{4B},$$

$$w_2^2 = \frac{T}{4K} - \frac{M_\theta}{2KL} + \frac{M_\psi}{4B},$$

$$w_3^2 = \frac{T}{4K} + \frac{M_\theta}{2KL} - \frac{M_\psi}{4B},$$

$$w_4^2 = \frac{T}{4K} + \frac{M_\theta}{2KL} + \frac{M_\psi}{4B}.$$

Эти значения затем используются для вычисления текущих состояний квадрокоптера, как упоминалось ранее. Эта модель используется для разработки как регулятора ориентации, так и контроллера траектории наряду с внедрением планировщика траектории [7].

Для синтеза системы управления одним квадрокоптером возможно использовать методику с упрощенной математической моделью [8]. Как уже было сказано, управление полетом дрона осуществляется влиянием на роторы пропеллеров и, как следствие, изменение силы тяги. При создании системы управления необходимо вывести ее математическую модель. Это осуществляется из предположения, что беспилотники, образующие МАРТС, имеют одинаковую конструкции и массо-инерционные характеристики, при этом центр масс каждого робота находится на пересечении балок, на которых закреплены винты. Движение объединения квадро-

коптеров описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{x}^k = V_x^k; \dot{y}^k = V_y^k; \dot{z}^k = V_z^k,$$

$$\dot{V}_x^k = (\sin\psi^k \sin\varphi^k + \cos\psi^k \sin\theta^k \cos\varphi^k)U_1^k / m,$$

$$\dot{V}_y^k = (-\cos\psi^k \sin\varphi^k + \sin\psi^k \sin\theta^k \cos\varphi^k)U_1^k / m,$$

$$\dot{V}_z^k = \frac{U_1^k}{m}\cos\theta^k \cos\varphi^k - g,$$

$$\dot{\theta}^k = \omega_\theta^k,\ \dot{\varphi}^k = \omega_\varphi^k,\ \dot{\psi}^k = \omega_\psi^k,$$

$$\dot{\omega}_\theta^k = \frac{(I_{yy} - I_{zz})\omega_\varphi^k\omega_\psi^k + J_{TP}\omega_\varphi^k\Omega^k + U_3^k}{I_{yy}},$$

$$\dot{\omega}_\varphi^k = \frac{(I_{zz} - I_{xx})\omega_\theta^k\omega_\psi^k + J_{TP}\omega_\theta^k\Omega^k + U_2^k}{I_{xx}},$$

$$\dot{\omega}_\psi^k = \frac{(I_{xx} - I_{yy})\omega_\varphi^k\omega_\theta^k + U_4^k}{I_{zz}},$$

где x^k, y^k, z^k – координаты центра масс k-го беспилотника; V_x^k, V_y^k, V_z^k, – проекции вектора линейной скорости k-го беспилотника; θ^k,φ^k,ψ^k – угол тангажа, крена и рыскания k-го беспилотника; ω_θ^k,ω_ϕ^k,ω_ψ^k – угловая скорость тангажа, крена и рыскания k-го беспилотника; U_1^k, U_2^k, U_3^k, U_4^k – сигналы по каналам управления; Ω^k – общая скорость четырех винтов k-го беспилотника; I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} – моменты инерции вокруг оси X, Y и Z; m – масса; $J_{\text{ТР}}$ – общий вращательный момент инерции вокруг оси винта.

При функционировании МАРТС решается целый спектр разнообразных задач:

– определение состава группы, необходимого и достаточного для эффективного решения технологической задачи;

– распределение функций между роботами группы для достижения конечной цели за минимальное время и при минимальных затратах;

– реализация законов управления отдельно взятыми роботами, которые одновременно обеспечивают как автономность робота, так и выполнение глобальной задачи в целом [9].

Решение задачи целераспределения возможно осуществляет наиболее быстродействующим методом линейного программирования, в частности Венгерским методом. В общем случае задача целераспределения ударных БПЛА может быть решена на основе анализа матрицы размерностью $N \times M$ [10]

$$\begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1m} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{n1} & W_{n2} & \dots & W_{nm} \end{bmatrix}.$$

Задача целераспределения является нелинейной оптимизационной задачей, которую традиционные алгоритмы решают с заметными временными задержками из-за большого количества операций.

В качестве элементов матрицы могут быть выбраны самые разнообразные критерии оптимизации решения задачи целераспределения в зависимости от постановки задачи, соотношения числа БПЛА и целей, типа целей и т. д. Решение задачи целераспределения можно представить в виде коэффициентов инцидентной матрицы [11].

При достижении целей в МАРТС решается большое количество разноплановых задач от с управления единичным квадрокоптером, до распределения целей группе квадрокоптеров. В большинстве случаев в математическом описании тех или иных задач используются матричные вычисления, поэтому в дальнейшем представляет интерес использовать сингулярные числа матрицы для оптимального подбора параметров управления.

В ближайшем будущем роботы будут активно делить жизненную среду с людьми, сотрудничая при выполнении различных повседневных задач. Присутствие робота может быть полезной поддержкой при осуществлении повседневной деятельности человека, при работе в опасных средах, а также для выполнения сложных комплексных задач.

При управлении МАРТС осуществляется контроль за большим количеством роботов. Используемые агенты группы руководствуются некоторыми общими правилами и по своему устройству обычно проще, нежели одиночные роботы, предназначенные для выполнения тех же задач. Большое количество простых роботов может выполнять сложные задачи более эффективно, чем один робот, придавая группе надежность и гибкость.

Список источников

1. *Скляров С. А.* Синергетическое управление группой мобильных роботов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014.

2. *Назарова А. В., Рыжова Т. П.* Методы и алгоритмы мультиагентного управления робототехнической системой // Вестник МГТУ им. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012.

3. *Юдинцев Б. С.* Синтез нейросетевой системы планирования траекторий для группы мобильных роботов // Системы управления, связи и безопасности. 2019.

4. *Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М., 2009. 280 с.

5. PID and Fuzzy-PID Control Model for Quadcopter Attitude with Disturbance Parameter / E. Kuantama, T. Vesselenyi, S. Dzitac, R. Tarca // International Journal of Computers, Communications & Control (IJCCC). 2017.

6. Modeling, simulation and complete control of a quadcopter / A. Sulficar, H. Suresh, A. Varma, A. Radhakrishnan // Department of mechanical engineering national institute of technology Karnataka. 2017.

7. Синтез системы управления квадрокоптером с использованием упрощенной математической модели / А. А. Пыркин, Т. А. Мальцева, Д. В. Лабадин и др. 2012.

8. *Веселов Г. Е., Скляров А. А., Скляров С. А.* Синергетический подход к управлению беспилотным летательным аппаратом // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013.

9. *Халимов Н. Р., Мефедов А. В.* Распределенная сетецентрическая система управления группой ударных беспилотных летательных аппаратов // Системы управления, связи и безопасности. 2017.

10. *Мефедов А. В.* Алгоритм оптимального целераспределения автономной группы ударных беспилотных летательных аппаратов // Информация и Космос. 2018. № 3.

УДК 621.01 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-257-265**

Х. Сяоян*
доктор технических наук, профессор
В. В. Перлюк**
кандидат технических наук, доцент
**Шэньянский политехнический университет*
***Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Предлагается использовать фильтр Калмана в системе управления аэродинамическими рулями беспилотного летательного аппарата. В работе проводится сравнение систем управления на базе адаптивного фильтра Калмана и на базе фильтра Калмана переменной структуры. В дальнейшем полученные результаты могут эффективно использоваться для точной оценки, сопровождения и сближения с движущейся целью при высокоточном траекторном управлении беспилотного летательного аппарата на больших расстояниях. Управляюший контроллер переменной структуры фильтра Калмана был разработан путем использования специального алгоритма. Разработана и построена модель управляющего контроллера. Результаты показывают, что такой контроллер обладает обладает рядом уникальных преимуществ в управлении беспилотным летательным аппаратом, что делает систему легко адаптируемой и высоконадежной.
Ключевые слова: *фильтр Калмана, передаточная функция, ошибки измерения, модель контроллера.*

H. Xiaoyang*
Dr. Sc. Tech., Professor
V. V. Perliouk*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University*
***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

USE OF A VARIABLE STRUCTURE KALMAN FILTER IN THE CONTROL LOOP OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

It is proposed to use the Kalman filter in the control system of the aerodynamic rudders of an unmanned aerial vehicle. The paper compares control systems based on an adaptive Kalman filter and based on a variable structure Kalman filter. In the future, the results obtained can be effectively used for accurate assessment, tracking and approach to a moving target with high-precision trajectory control of an unmanned aerial vehicle over long distances. The Kalman filter structure variable control controller was designed using a special algorithm. A model of the control controller has been developed and built. The results show that such a controller has a number of unique advantages in controlling an unmanned aerial vehicle, which makes the system highly adaptable and highly reliable.
Keywords: *Kalman filter, transmission function, measurement errors, controller model.*

Введение

Система управления классическим беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) с аэродинамическими рулями обычно представляет собой высокоточную сервосистему позиционирования, которая может являться важной составной частью системы наведения. Когда на управляющий контроллер рулевого механизма поступает требуемое значение угла отклонения поверхности рулевого управления, система может или управлять отклонением рулевой поверхности или поддерживать заданное значение параметров траектории полета и ориентацией БПЛА. Таким образом, система может достичь цели точного дистанционного управления, что формирует в целом маневренные и динамические характеристики БПЛА [1]–[3].

Довольно широко в качестве привода рулевых поверхностей легких БПЛА используются электрические серводвигатели. При этом они в основном используют два алгоритма управления:

– алгоритм адаптивного управления, обладающий возможностями самокоррекции;

– алгоритм управления переменной структурой, который имеет лучшую надежность, чем традиционные алгоритмы управления. Он мо-

жет обеспечить сложные процессы функционирования сервосистемы и облегчить решение задачи полета летательного аппарата по заданной траектории.

В современных приложениях теории управления фильтр Калмана играет очень важную роль. В целом он представляет собой рекурсивный алгоритм, работающий в реальном времени с минимальной среднеквадратической ошибкой в качестве критерия оценки. В случае помех измерителей и регулярных внешних помех фильтр Калмана может эффективно подавить помехи посредством оценки, прогнозирования и коррекции, а далее сформировать улучшенный полезный сигнал. Но в системе управления рулем направления решающую роль играет выбранная стратегия формирования траектории полета летательного аппарата. При этом ее основная роль состоит в обеспечении точного отслеживания положения летательного аппарата на траектории. Далее алгоритм управления должен оценивать значение текущего состояния объекта управления на основе предыдущих его состояний и текущего прогнозируемого и оценочного состояния [4]–[10].

В данном исследовании предлагается включить фильтр Калмана в переменную структуру скользящего режима оценки измеряемых параметров и разработать контроллер на базе переменной структуры фильтра Калмана обеспечивающего компенсацию ошибок измерения и других внешних факторов. Этот алгоритм включает в себя:

– изменение модели системы управления полетом БПЛА;

– формируется необходимая структура адаптивного контроллера на базе переменной структуры фильтра Калмана;

– строится комбинированная модель системы управления летательным аппаратом;

– проводится новый цикл моделирования.

Результаты проведенного исследования подтверждают, что производительность исследуемого контроллера значительно улучшена по сравнению с традиционным классическим контроллером.

Используемая модель фильтра Калмана

Фильтр Калмана может применяться как к линейным системам с непрерывным временем, так и к линейным системам с дискретным временем, где добавляются внешние случайные возмущения и шумы. Передаточная функция линейной непрерывной системы исполнительных механизмов может быть преобразована в следующее линейное дискретное уравнение модели состояния

$$\begin{cases} x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \\ z_k = Hx_k + v_k \end{cases}, \quad (1)$$

где x_k – системная N-мерная оценочная переменная состояния системы; A – $n\times n$-мерная матрица переходов состояний системы; B – матрица усиления $n\times l$-мерного управляющего воздействия; w_k, ν_k – матрица шума процессов в системе L-размерности и матрица шума измерений M-размерности соответственно.

Предположим,

$$\begin{cases} E(w_k) = 0, \;\; E(v_k) = 0; \\ E(w_k v_j^T) = 0, \;\; E(w_k w_j^T) = Q\delta_{kj}, \\ E(v_k v_j^T) = R\delta_{kj}, \end{cases} \quad (2)$$

где z_k – измерительная переменная системы m-размерности; H_k – матрица измерений m-размерности; B – матрица усиления $n\times l$-мерного управляющего воздействия; $w_{k,}$ ν_k – матрица шума процессов в системе L-размерности и матрица шума измерений M-размерности соответственно; R – неотрицательная матрица дисперсии шума процесса в системе; Q – симметричная положительно определенная дисперсия наблюдаемого шума в системе; δ_{kj} – Дельта-функция Кронекера.

Переменная u_k представляет собой элемент управления с переменной структурой для скользящего режима. Если ограничения и допущения приведенных выше уравнений выполняются, то приведенное ниже уравнение становится стохастическим линейным дискретным базовым уравнением фильтрации Калмана во времени одноэтапного прогнозирования переменных состояния

$$\hat{x}_{k,k-1} = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1}. \quad (3)$$

Используя это уравнение, мы можем вывести следующее прогнозируемое значение величины состояния системы из оцененного значения фильтра Калмана, которое является оценочным значением фильтра Калмана для значения состояния системы. Его значение оценивается по системным наблюдениям в это время. Оценка состояния может быть представлена как

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k,k-1} + K_k(z_k - H\hat{x}_{k,k-1}), \quad (4)$$

где $\hat{x}_k$ – оценочное значение переменной состояния системы x_k, которое вычисляется из одно-

шагового предсказанного значения переменной состояния системы $\hat{x}_{k,k-1}$ и наблюдаемого значения z_k системы, в которой определяется $\hat{z}_k$ как новая процентная последовательность и в сочетании с уравнением измерения системы может быть записана в виде

$$\tilde{z}_k = z_k - H\hat{x}_{k,k-1} = Hx_k + v_k - H\hat{x}_{k,k-1} = \\ = H(x_k - \hat{x}_{k,k-1}) + v_k, \quad (5)$$

где $x_k - \hat{x}_{k,k-1}$ – ошибка одношагового прогнозирования переменной состояния системы x_k, системы для проведения оценки Калмана. Получаемзначения коэффициентов усиления фильтра

$$K_k = P_{k,k-1}H^T(HP_{k,k-1}H^T + R_k)^{-1}, \quad (6)$$

где R_k – матрица среднеквадратичной ошибки шума наблюдения ν_k.

Моделирование фильтра Калмана в канале рулевого управления БПЛА

Рассмотрим внешние возмущения на канал рулевого управления. На рис. 1 показана система управления при добавлении технологического шума w_k и шума ν_k [11].

Передаточная функция системы рулевого управления упрощена, и ее параметры дискретизированы следующим образом:

$$A = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.006 \\ 0 & 0.2926 \end{bmatrix}, \; B = \begin{bmatrix} 0.0001 \\ 0.0656 \end{bmatrix}, \; H = [1,0].$$

В алгоритме фильтра Калмана используются параметры Q=10, R=10. Моделирование системы с помощью модуля симуляции s-функции, параметры контроллера с переменной структурой c=65, ε=30, q=800.

Модуль моделирования регулятора переменной структуры на основе экспоненциального фильтра Калмана показан на рис. 2.

Как показано на рис. 3–10, при добавлении ступенчатого сигнала амплитуды 1°, сигнала амплитуды 1 °, синусоидального сигнала 10 Гц, шума процесса и измерения, контроллер с переменной структурой без алгоритма фильтра Калмана и контроллер с переменной структурой фильтра Калмана моделируются.

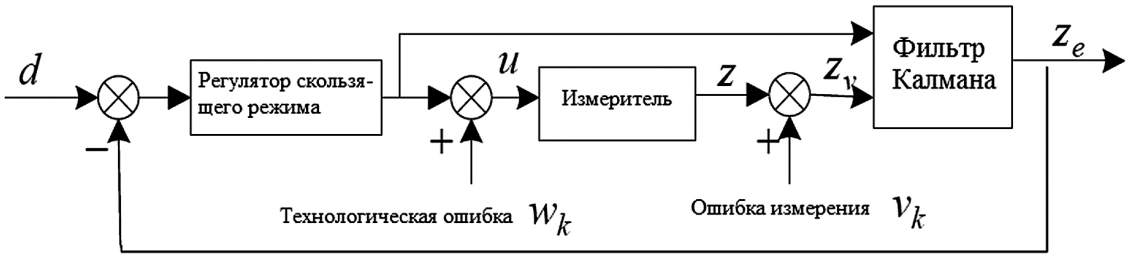


Рис. 1. Система управления фильтрацией Калмана с переменной структурой

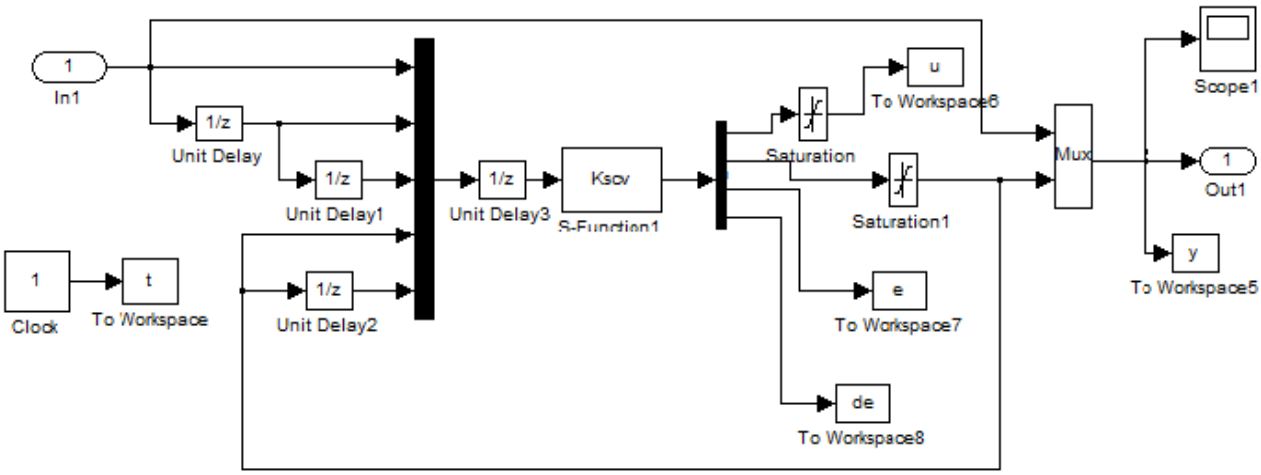


Рис. 2. Модель регулятора с переменной структурой на основе фильтра Калмана

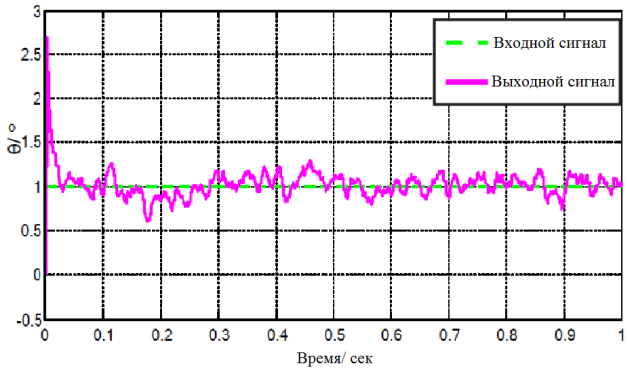


Рис. 3. Контроллер с переменной структурой без фильтра Калмана

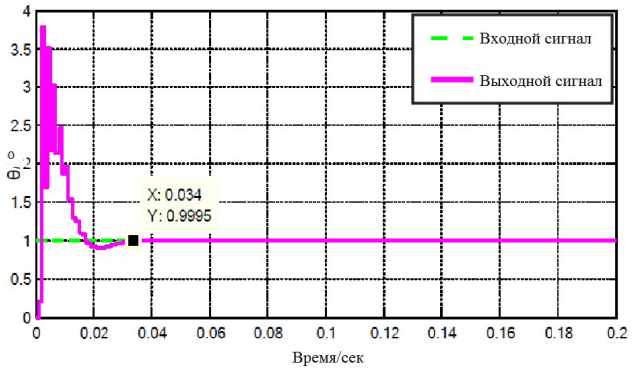


Рис. 5. Регулятор переменной структуры на основе фильтра Калмана

Установка параметра: шум процесса в пределах [–0,3,0,3], ν_k сигнал белого шума в пределах [–0,3,0,3].

Результаты моделирования на рис. 3 и 4 показывают, что контроллер с переменной структурой может ограничивать влияние шумовых помех на управляемый объект, когда система управления достигает стабильного состояния за короткое время, но его движение явно нестабильно. Выходной сигнал системы колеблется между амплитудами 1,5 и –0,5 вместе с возмущением [12]–[15]. В то же время движение переменной структуры скользящего режима постепенно приближается к установленной поверхности переключения из начального состояния, чтобы достичь стабильного состояния, работа движущейся дорожки значительно перемещается вверх и вниз по заданной дорожке. Усиливается вибрация переменной структуры, что делает работу системы нестабильной. Таким образом, для сервосистемы с высокоточным отслеживанием положения контроллер переменной структуры не имеет значения для сервосистемы при случайном возмущении.

Результаты моделирования на рисунках 5 и 6 показывают, что перерегулирование регулятора σ=380 %, время настройки t=0,034 сек., а ошибка устойчивости системы составляет 0,08 %. В случае внешнего возмущения регулятор переменной структуры без алгоритма фильтра Калмана не может обеспечить точное управление, когда система достигает устойчивого состояния

После введения алгоритма фильтра Калмана контроллер эффективно ослабляет случайные возмущения, и движение в скользящем режиме может быстро достигать поверхности переключения из начального состояния, а фазовый сдвиг постепенно становится стабильным для достижения движения по заданной траектории по сравнению с управление переменной структурой, его амплитуда мала и плавает вверх и вниз по поверхности переключения, что значительно снижает вибрацию переменной

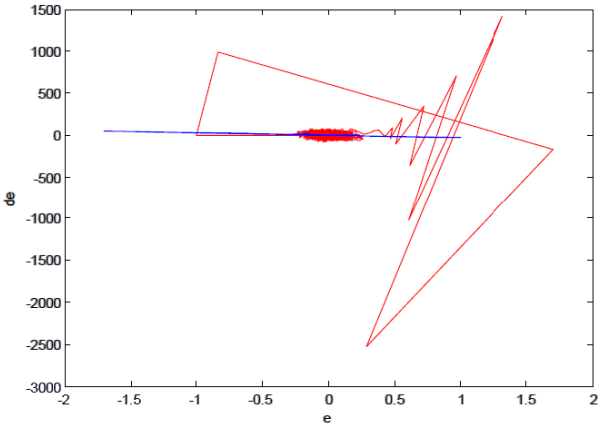


Рис. 4. Фазовый сдвиг переменной структуры скользящего режима, S-движение

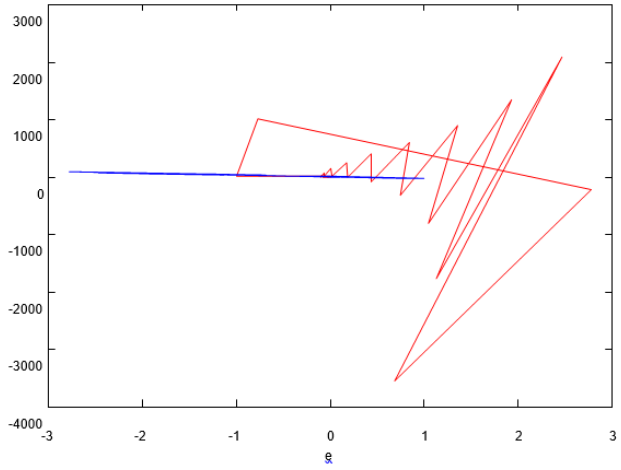


Рис. 6. Фазовый сдвиг скользящего режима фильтрации Калмана

структуры. А преимущества систем управления с переменной структурой полностью передаются «по наследству» [16]. Результаты моделирования показывают, что контроллер переменной структуры фильтра Калмана может не только обеспечить превосходную производительность управления переменной структурой управляемого объекта, но также может эффективно подавлять шумовые помехи.

Результаты моделирования показывают, что контроллер переменной структуры фильтра Калмана может обеспечить отличные характеристики управляемого объекта управления переменной структурой и эффективно подавлять шумовые помехи. Он может быстро отфильтровывать шумовые помехи различной интенсивности и различных инструкций и выводить требуемый сигнал. В нем улучшена противоинтерференционная способность и адаптивность системы. Контроллер может заставить систему рулевого управления адаптироваться к неизвестной сложной траектории и улучшить точность наведения летательного аппарата.

Разработка и моделирование адаптивного контроллера с переменной структурой фильтра Калмана

Можно сделать вывод, что контроллер фильтра Калмана может эффективно фильтровать входной сигнал с внешними случайными помехами. Но фильтр Калмана также имеет свои ограничения. При проектировании контроллера необходимо иметь точное уравнение состояния системы, которое формирует входной процесс, то есть для применения фильтра Калмана для ослабления шума необходимо иметь известные статистические характеристики шумовых возмущений, в противном случае – характеристики фильтра. не может достичь желаемого эффекта [17], но бортовая система летательного аппарата не может точно предсказать внешний шум в системе рулевого механизма, поэтому система не может обеспечить оптимальную фильтрацию. Сам адаптивный фильтр предназначен для адаптации к различным средам, для интерактивного обучения, настройки, поэтому фильтр Калмана на основе конструкции адаптивного контроллера фильтра Калмана, а также его преимущества и недостатки сравниваются и анализируются [18], [19].

Рассмотрим адаптивный алгоритм Калмана. Матрица дисперсии R шума наблюдения системы и матрица дисперсии Q шума возбуждения не могут быть предсказаны в реальном времени. В сложной среде матрица наблюдения H и матрица состояния A системы могут измениться. Другими словами, шум, воспринимаемый системой рулевого управления, нельзя точно предсказать во время фактического полета БПЛА. Такая модель не может точно отражать состояние в реальном времени, так что контроллер не может полноценно решать свою задачу, следовательно, система рулевого управления не может точно отрегулировать пространственное положение летательного аппарата.

В данном исследовании при разработке контроллера с переменной структуры фильтра Калмана использовался адаптивный алгоритм Сейджа – Хуса, и адаптивный контроллер переменной структуры фильтра Калмана. Сэйдж и Хус предложили адаптивный алгоритм, основанный на классическом фильтре Калмана.

В сочетании с обобщенным принципом фильтра Калмана и дискретной формулой (1) для передаточной функции системы рулевого управления предполагается, что статистические характеристики шума w_k и V_K имеют следующий вид [20], [21]

В сочетании с обобщенным принципом фильтра Калмана и дискретной формулой (1) для передаточной функции системы рулевого управления предполагается, что статистические характеристики шума w_k и ν_k имеют следующие значения: [17], [18]

$$\begin{cases} E(w_k) = q_k \quad , E(\upsilon_k) = r_k \\ E(w_k \upsilon_j^T) = 0 \\ E(w_k w_j^T) = Q_k \delta_{kj}, \quad E(\upsilon_k \upsilon_j^T) = R_k \delta_{kj} \end{cases}, \qquad (9)$$

где q_k – среднее значение технологического шума w_k; r_k – среднее значение наблюдаемого шума ν_k; q_k,r_k, Q_k,R_k невозможно определить.

Адаптивный фильтр Калмана – это использование переменных наблюдения z_k для получения адаптивных фильтров Калмана и статистических оценок системного шума. Ниже приведена его модель:

Одношаговое предсказание состояния переменной состояния:

$$\hat{x}_{k,k-1} = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1} + \hat{q}_K. \qquad (10)$$

Оценка состояния:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k,k-1} + K_k \hat{z}_k. \qquad (11)$$

Новая информационная последовательность:

$$\tilde{z}_k = z_k - H_k \hat{x}_{k,k-1} - \hat{r}_k. \qquad (12)$$

Матрица коэффициентов усиления фильтра:

$$K_k = P_{k,k-1}H_k{}^T(H_kP_{k,k-1}H_k{}^T + R_k)^{-1}. \quad (13)$$

Максимум ковариации ошибки прогнозирования за один шаг:

$$P_{k,k-1} = A_{k,k-1}p_{k-1}A_{k,k-1}{}^T + B_{k,k-1}\hat{Q}_{k-1}B_{k,k-1}{}^T. \quad (14)$$

Ковариационная матрица ошибок оценки:

$$P_k = (I - K_kH_k)P_{k,k-1}. \quad (15)$$

Используя модель оценки Sage-Husa, максимальную апостериорную статистику шума можно вычислить следующим образом:

$$\hat{r}_k = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}[z_j - H_j\hat{x}_{j,k}]; \quad (16)$$

$$\hat{R}_k = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}[z_j - H_j\hat{x}_{j,k} - r][z_j - H_j\hat{x}_{j,k} - r]^T; \quad (17)$$

$$\hat{q}_k = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}[\hat{x}_{j,k} - A_{j-1,j-2}\hat{x}_{j-1,k}]; \quad (18)$$

$$\hat{Q}_k = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}[\hat{x}_{j,k} - A_{j-1,j-2}\hat{x}_{j-1,k} - q]\times \times[\hat{x}_{j,k} - A_{j-1,j-2}\hat{x}_{j-1,k} - q]^T. \quad (19)$$

Уравнения (16)–(19) могут быть аппроксимированы прогнозной оценкой $\hat{x}_{j,j-1}$ ($\hat{x}_{j,j}$) переменной состояния системы X_k, чтобы заменить относительно сложную гладкую оценку $\hat{x}_{j,k}$ в уравнении, и тогда по новой информации $\hat{z}_k$ среднее значение от нуля к белому шуму, $E[\hat{z}_k] = 0$, $E[\hat{z}_k\hat{z}_k^T] = H_kP_{k,k-1}H_k^T + R$. Поэтому шум системного процесса, среднее значение наблюдаемого шума $\hat{q}_k$ и оценка $\hat{r}_k$ являются несмещенными

$$\hat{r}_k = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}[z_j - H_j\hat{x}_{j,j-1}]; \quad (20)$$

$$\hat{q}_k = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}[\hat{x}_{j,j} - A_{j-1,j-2}\hat{x}_{j-1,j-1}]. \quad (21)$$

Получаем следующие оценки

$$E[\hat{R}_k] = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}E[\tilde{z}_k\tilde{z}_k^T] = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}H_kP_{k,k-1}H_k^T + R. \quad (22)$$

Уравнение (22) показывает, что оценка смещена, поэтому оценка субоптимальной несмещенной статистики максимального апостериорного шума

$$\hat{R}_k = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}[\tilde{z}_k\tilde{z}_k^T - H_kP_{k,k-1}H_k^T]. \quad (23)$$

То же самое можно сказать о

$$\hat{Q}_k = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}[A_{j-1,j-2}P_{j,j-1}A_{j-1,j-2}^T - P] + Q. \quad (24)$$

Таким образом, может быть получена окончательная оценка адаптивного фильтра Калмана Суга –Хуса.

$$\hat{r}_k = (1 - d_{k-1})\hat{r}_k + d_{k-1}(z_k - H_k\hat{x}_{k,k-1}); \quad (25)$$

$$\hat{R}_k = (1 - d_{k-1})\hat{R}_k + d_{k-1}(\tilde{z}_k\tilde{z}_k^T - H_kP_{k,k-1}H_k^T); \quad (26)$$

$$\hat{q}_k = (1 - d_{k-1})\hat{q}_k + d_{k-1}(\hat{x}_k - A_k\hat{x}_{k-1}); \quad (27)$$

$$\hat{Q}_k = (1 - d_{k-1})\hat{Q}_k + +d_{k-1}(K_k\tilde{z}_k\tilde{z}_k^T + P_k - A_{k,k-1}P_kA_{k,k-1}^T). \quad (28)$$

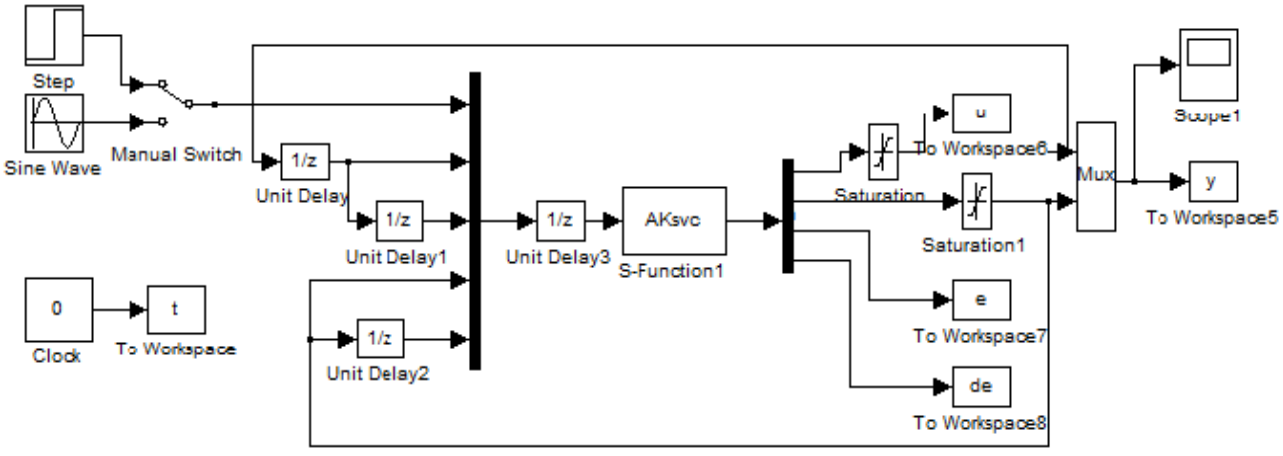


Рис. 7. Модель адаптивного контроллера Калмана с переменной структурой

При этом $d_{k-1} = (1-b)/(1-b^k)$, $0 < b < 1$ является фактором забывания. Алгоритм управления адаптивным фильтром Калмана Суга – Хуса состоит из (22)–(25).

Моделирование адаптивного контроллера с переменной структурой фильтра Калмана

Параметры:

$$A = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.006 \\ 0 & 0.2926 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0.0001 \\ 0.0656 \end{bmatrix}, \quad H = [1,0],$$

диапазон технологического шума в системе $w(k)$ и шума наблюдения системы $\nu(k)$ составляет [-0,3,0,3], среднее значение равно 0. Параметры контроллера переменной структуры $\varepsilon = 200$, $c = 10$, $q = 300$;

В соответствии с моделью контроллера с переменной структурой на рис. 7, был разработан функциональный модуль «AKSVC» управления с переменной структурой, с помощью которого выполнялась имитация работы контроллера при поступлении входного синусоидального сигнала частотой 10 Гц, (как показано на рис. 8 и 13) для адаптивного фильтра Калмана. начальное моделирование различных параметров контроллера с переменной структурой.

На рис. 9 представлена исходная модель регулятора с различными параметрами регулятора b.

Задаем следующие параметры настройки фильтра: b_0=0.01, P_0=0.05, $\hat{r}_o$ =0, $\hat{q}_o$ =0, $\hat{q}_o$ = 0, $\hat{Q}_o$ =10, $\hat{R}_o$ =10.

На рис. 11 показано моделирование контроллера при синусоидальном сигнале амплитудой 10 и частотой 10 Гц.

Перерегулирование σ=230 % и время настройки t=0,028 сек. контроллера адаптивного фильтра Калмана можно получить из рис. 10, на нем же можно увидеть коэффициент ошибок контроллера. Контроллер адаптивного фильтра Калмана может быстро настроить систему, обеспечить тенденцию функционирования системы с целью стабильного и эффективного фильтрования внешних шумовых помех. Из рис. 8–10 видно, что контроллер может хорошо

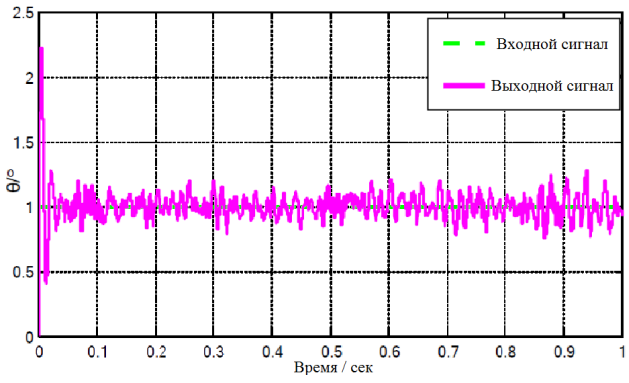


Рис. 8. Моделирование контроллера с переменной структурой с шумовыми помехами

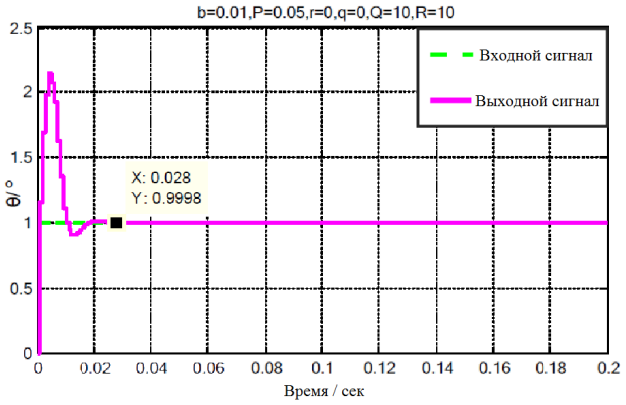


Рис. 9. Адаптивное моделирование переменной структуры Калмана

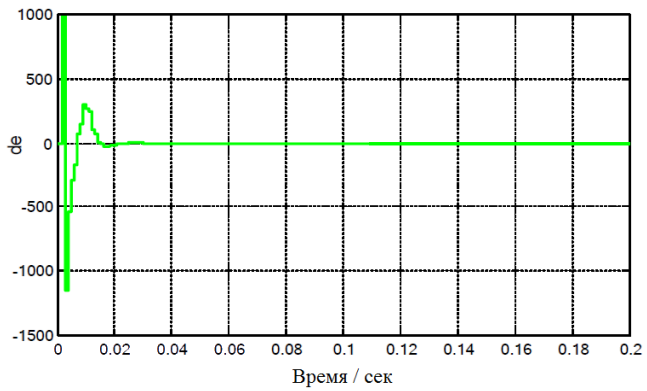


Рис. 10. Скорость изменения ошибки измерения

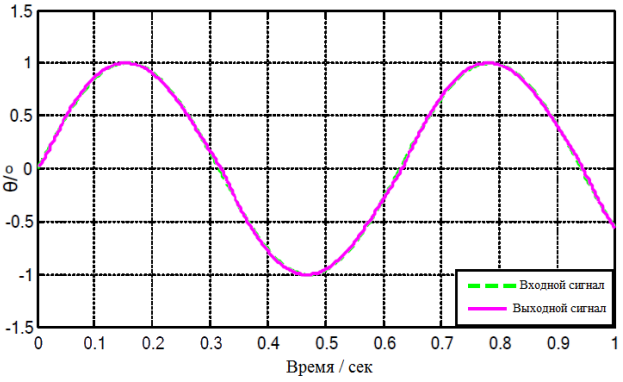


Рис. 11. В качестве синусоидального сигнала имитация контроллера

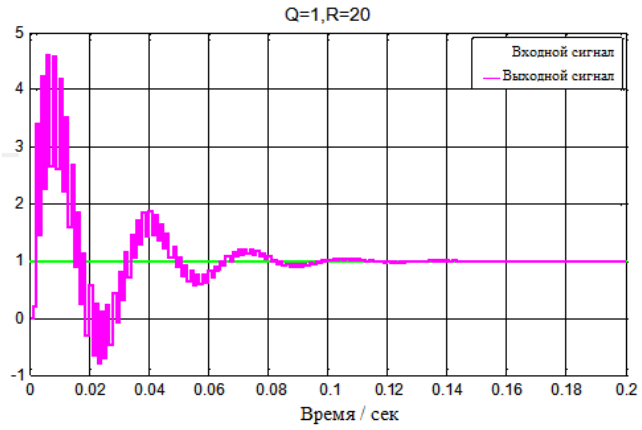


Рис. 12. Моделирование контроллера с переменной структурой Калмана

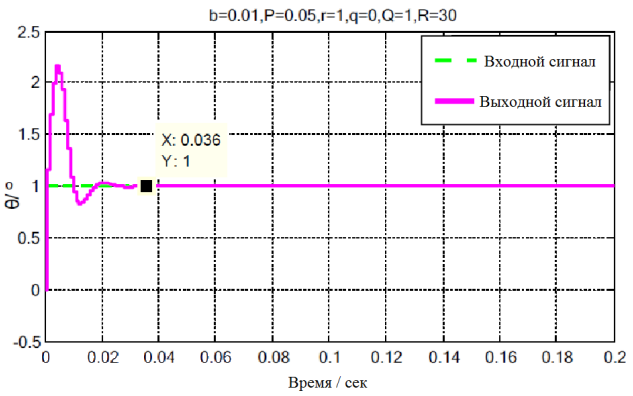


Рис. 13. Адаптивное моделирование переменной структуры Калмана

обеспечивать формирование заданного сигнала при различном входном шуме. Можно сделать вывод, что производительность контроллера очень близка к производительности контроллера с переменной структурой фильтра Калмана, с быстрым временем регулирования, сильной фильтрацией, возможностью управления и надежностью.

Результаты моделирования показывают, что адаптивный контроллер фильтра Калмана имеет определенное перерегулирование, но его стабильность лучше, чем у контроллера на базе классического фильтра Калмана. Он использует статистическую оценку изменяющегося во времени шума, а затем итеративно фильтруют наблюдаемый шум. Правда, точность не так высока, как у контроллера фильтра Калмана, если статистические характеристики шума постоянны.

Если диапазон шума процесса системы $w(k)$ и шума наблюдения системы $\nu(k)$ составляет [-0,3,0,3] и среднее значение равно 0, тогда $\nu(k)$=10, R_0=10, c=65, ε=20, q=600.

Шумовая помеха Q=1, R=20 при заданном начальном значении регулятора фильтра Калмана представлена на рис. 12 моделирования регулятора с единичным ступенчатым сигналом. Как показано на рис. 13, производительность контроллера переменной структуры фильтра Калмана значительно снижается, когда начальные значения шумовых параметров Q и R не совпадают с реальными значениями, поэтому контроллеру фильтра Калмана требуется предварительное знание статистических характеристик помехи сигнала и шума, а его характеристики управления намного хуже, чем у адаптивного контроллера переменной структуры фильтра Калмана. Следовательно, в сложной внешней среде функционирования рулевого управления, шумовое возмущение иногда бывает неопределенным, и адаптивный контроллер фильтра Калмана может обеспечить лучшую эффективность работы контура управления.

Эффективность регулятора переменной структуры адаптивного фильтра Калмана достигается, когда среднее значение шума системного процесса w_k равно q_k, среднее значение ν_k шума r_k наблюдается, а начальное значение Q_k и R_k отличается

$$b_0=0.01,\ P_0=0.05,\ \hat{r}_o=1,\ \hat{q}_o=0,$$

$$\hat{q}_o=0,\ \hat{Q}_o=1,\ \hat{R}_o=30.$$

Моделирование показывает, что адаптивный регулятор переменной структуры фильтра Калмана чувствителен к начальным значениям. Смоделированная шумовая помеха представляет собой сигнал белого шума со средним значением 0 и диапазоном [-0,3,0,3]. В (1) параметр $\hat{r}_o$ = 0, $\hat{q}_o$ = 0, $\hat{Q}_o$ = 10, $\hat{R}_o$ = 10 согласуется с реальным значением, эффект управления наилучший, перерегулирование мало, время настройки заведомо меньше (2), (3) различное моделирование параметров показывает, что начальное значение настройки регулятора ближе к шумовой характеристике, чем лучше качество управления, тем быстрее система достигает устойчивости; когда ошибка начального значения велика.

Выводы

Из результатов моделирования видно, что адаптивный контроллер переменной структуры фильтра Калмана очень чувствителен к параметрам настройки, но когда начальное значение настроек близко к реальному значению,

можно гарантировать высокую точность. В целом, хотя адаптивная фильтрация Калмана с переменной структурой контроллера для требуемых параметров имеет очевидные преимущества, в процессе движения БПЛА могут быть неопределенные факторы, приводящие к возмущениям. При этом изменяется математическая модель и шумовые статистические характеристики, а именно A, H или R, Q. В процессе работы контроллер может оценить происходящие изменения в режиме реального времени и объединить с наблюдаемой информацией, чтобы эффективно улучшить адаптивность, стабильность и надежность системы.

Список источников

1. *Zhongwan L.* Research on Servo Control System of Missile Steering Gear Based on DSP [D] [Master's Thesis]. Xi 'an: Northwestern Polytechnical University, 2014.

2. *Sun L., Lu J.* Variable structure controller design For Boolean networks [J]. Neural networks, 2018.

3. *Shengming W.* Nanjing University of Science and Technology, 2010.

4. *Hairong Y.* Design of Electric Steering Gear Based on Variable Structure Control [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.

5. BI Ye. Design and Development of Digital Servo Control System for Steering Gear of Flight Missile [D]. Xi 'an: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.

6. *Zhidan Z.* Research on Variable Structure Control Algorithm and Its Application in Missile Control System [D]. Harbin Engineering University, 2013.

7. *Синь В., Гонг Д., Перлюк В. В.* Исследование закона наведения с ограничением угла встречи на основе оптимального управления // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: сб. докладов третьей международной научной конференции. СПб., 2022. С. 20–25.

8. *Сяоян Х., Перлюк В. В.* Исследование однопараметрического нечеткого контроллера прямой связи // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: сб.докладов третьей международной научной конференции. СПб., 2022. С. 33–38.

9. *Сяоян Х., Перлюк В. В.* Применение бортового одопараметрического контроллера нечеткой логики для увеличения точности управления малым беспилотным телательным аппаратом // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: сб. статей IV международного форума. СПб., 2023. С. 136.

10. *Ping J., Jing S.* Modeling and Simulation of Electric Steering Gear System [J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2015. (15):80–82.

11. *Hongqi Z.* Research on application of novel Adaptive Kalman Filter Algorithm in Integrated Navigation [D]. [Master's Thesis]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.

12. *Zhang C., Liu N.* Design of Sliding Mode Variable Structure Servo Driver Based on Hardware[J]. Journal of Electrical Systems, 2017. 13 (1).

13. *Huo J., Shan J.* Design of Spacecraft Controller Based on Adaptive Fuzzy Sliding Mode Variable Structure [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013. 261, 7.

14. *Xiao X.* Research on the Step by Step Sliding Mode Variable Structure Adaptive Control [J]. Advanced Materials Research, 2013. 931.

15. *Jian X.* Design and application of an improved global sliding mode variable structure controller [J]. Control engineering of China, 2018. 25(04):587–590.

16. *Lubing X.* Research on Anti-jamming Tracking Control Algorithm for Hypersonic Vehicle [D]. Yangzhou University, 2018.

17. *Rudong S.* Research and Implementation of Adaptive Fuzzy Control Algorithm [D]. Harbin Institute of Technology, 2008.

18. *Jun Y.* Transient Performance Enhancement of Adaptive Control System and its application in Aircraft Attitude Control [D]. Kunming University of Science and Technology, 2020.

19. *Wei L.* Application of Kalman Filter and Genetic PID Control algorithm in improving sowing accuracy [J/OL] // Journal of anhui agricultural university. 2021.

20. *Li W.* Identification of Steering Gear Transfer Function Based on Adaptive Genetic Algorithm [J]. Electronic Testing, 2012. (03):12–15.

УДК 681.5.09 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-266-274**

И. И. Таболин*
аспирант
Р. Ю. Кузьменко*
аспирант
А. Д. Данилов*
доктор технических наук, профессор
**Воронежский государственный технический университет*

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ АППАРАТУРЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ БОРТОВОЙ СЕТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Приведен способ повышения надежности вероятности безотказной работы аппаратуры регулирования и контроля. Разработаны структурные схемы для расчета надежности отдельных функциональных узлов. Приведены результаты расчета вероятности безотказной работы аппаратуры регулирования и контроля при выполнении функции «Формирование и передача энергии в АРК» на разных этапах эксплуатации в течение 24 ч, 120 ч, 720 ч и 8760 ч.
Ключевые слова: *система энергоснабжения, бортовая сеть, аппаратура регулирования и контроля, надежность, вероятность безотказной работы.*

I. I. Tabolin*
PhD Student
R. Y. Kuzmenko*
PhD Student
A. D. Danilov*
Dr. Sc. Tech., Professor
**Voronezh State Technical University*

RELIABILITY IMPROVEMENT OF FAILURE-FREE OPERATION PROBABILITY FOR THE REGULATION AND MONITORING EQUIPMENT OF SPACECRAFT ONBOARD NETWORK

This article presents a way to improving the reliability of the probability of failure-free operation of the regulation and monitoring equipment. Block diagrams for calculating the reliability of individual functional units are developed. The results of calculating the probability of failure-free operation for the regulation and monitoring equipment during the performance of the function «Formation and transmission of energy in the RME» at different stages of operation for 24 h, 120 h, 720 h and 8760 h are presented.
Keywords: *power supply system, onboard network, and monitoring equipment, reliability, probability of failure-free operation.*

Введение

Бортовая сеть – это система энергоснабжения космического аппарата (КА), обеспечивающая электропитание других систем. Она является одной из важнейших систем, надежность которой в наши дни является одним их актуальных вопросов при ее проектировании.

Для обеспечения работоспособности бортовой сети, а также обработки ее параметров в настоящее время разрабатывается аппаратура регулирования и контроля (АРК) – система автоматического регулирования и контроля энергоснабжения бортовой сети, которая совместно с первичными источниками энергии – солнечными батареями (СБ), и вторичными источниками энергии – литий-ионными аккумуляторными батареями (ЛИАБ), обеспечивает потребителей бортовой сети электрической энергией на этапах наземных испытаний и предстартовой подготовки (с использованием наземных источников питания), а также во всех режимах полета [1]–[3].

АРК предназначена для выполнения следующих функций:

– формирование на выходных шинах АРК напряжения постоянного тока 28,5 В при посту-

плении энергии от СБ, ЛИАБ или орбитальной пилотируемой станцией (ОПС) в соответствии с заданными алгоритмами работы КА и солнечной ориентации на орбите;

– стабилизация напряжения в точках регулирования на выходных шинах 28,5 В;

– регулирование тока батареи СБ, управление разрядом ЛИАБ при дефиците энергии, передача энергии от ОПС;

– выравнивание зарядных токов ЛИАБ и ограничение зарядных токов ЛИАБ при избыточной мощности СБ и от ОПС;

– выравнивание токов разряда АБ;

– раздельный заряд ЛИАБ ступенчатым током;

– ограничение тока от ОПС, потребляемого через АРК;

– формирование телеметрической информации об основных параметрах АРК и ЛИАБ;

– формирование защиты от перезаряда ЛИАБ в течение нештатной ситуации с нарушением работы бортового компьютера КА (БК) и модуля контроля и управления ЛИАБ (МКУ);

– прием и исполнение команд управления от БК и наземного комплекса управления и выдача сигнализации об их исполнении.

Основным назначением АРК является выполнение функции «Формирование и передача энергии в АРК», то есть формирование и стабилизация на выходных шинах напряжения постоянного тока 28,5 В. Таким образом, надежность вероятности безотказной работы (ВБР) данной функции АРК будет отражать надежность самой АРК и бортовой сети КА в целом.

Функцию «Формирование и передача энергии в АРК» в автономном режиме работы КА выполняют четыре регулятора тока СБ и четыре зарядно-разрядных устройства для четырех ЛИАБ. Отказом при выполнении АРК этой функции в автономном режиме является возникновение любого из перечисленных ниже событий:

– прекращение передачи на шину 28,5 В тока от одной СБ;

– не прохождение в любую ЛИАБ зарядного тока с шины 28,5 В;

– отсутствие передачи на шину 28,5 В разрядного тока любой из ЛИАБ

Целью данной работы является определение предварительной величины показателя надежности ВБР АРК при выполнении функции «Формирование и передача энергии в АРК». Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

– привести описание входящих в состав АРК функциональных узлов;

– разработать структурные схемы функциональных узлов АРК для дальнейшего расчета надежности ВБР АРК;

– провести расчет интенсивности отказов различных участков полученных схем;

привести результаты расчета ВБР отдельных модулей АРК;

– привести результаты расчета ВБР АРК при выполнении функции «Формирование и передача энергии в АРК» на разных этапах эксплуатации КА.

Состав АРК

АКР в своем составе содержит следующие основные функциональные узлы (модули):

– регуляторы тока СБ (РТ);

– зарядно-разрядные устройства ЛИАБ (ЗРУ);

– аппаратно-программный модуль АРК (АПМ);

– стабилизатор напряжения (СН).

Рассмотрим основное назначение каждого модуля [3].

РТ выполнен в виде регулятора параллельного типа, обеспечивает непрерывное регулирование тока генератора СБ и автоматически включается в работу при подключении их ко входу СБ или наземного источника питания – имитатора СБ.

ЗРУ обеспечивает процессы заряда и разряда ЛИАБ:

– заряд ЛИАБ с выравниванием токов заряда между ЛИАБ и с ограничением зарядного тока;

– ступенчатый заряд по командам с блока электроники; передача тока от ЛИАБ со стабилизацией напряжения шины на уровне 28,5 В и выравнивание токов разряда между ЛИАБ;

– ограничение разрядного тока ЛИАБ;

– прием и исполнение команд управления от блока электроники ЛИАБ.

АПМ предназначен для обеспечения информационной связи между БК, РТ, ЗРУ, СН и МКУ.

СН предназначен для:

– обеспечения без гальванической развязки преобразования напряжения постоянного тока (20–37) В в стабилизированное напряжение (28,5±0,5) В в установившемся режиме и (28,5±1,5) В в переходных режимах, связанных со скачкообразным изменением нагрузки до 25 А;

– ограничения величины выходного тока на уровне (30±1) А;

– сохранения работоспособности после короткого замыкания в выходных цепях;

– передачи информации о текущем состоянии СН, значениях входных и выходных токов, выходного напряжения.

Перейдем к описанию технических решений для повышения надежности каждого модуля, а также построения логических структурных схем на основе приведенных описаний для дальнейшей оценки надежности данных модулей и АРК в целом. Начнем с описания модуля РТ.

Описание и структурная схема для модуля РТ

Модуль РТ [4] содержит два резервированных регулятора тока и включает в свой состав:

– два силовых модуля (СМ) СМР1 и СМР2;

– два унифицированных микроконтроллера (МК) МК1 и МК2;

– соединители для подключения к наземному источнику питания и к двум СБ.

Структурная схема для двух резервированных регуляторов тока представлена на рис. 1.

Структурное построение СМР и МК выполнено Таким образом, что каждый МК может управлять любым СМ и обеспечивает синхронную работу основного и резервного СМР в режиме горячего резерва, что существенно повышает общую надежность модуля РТ.

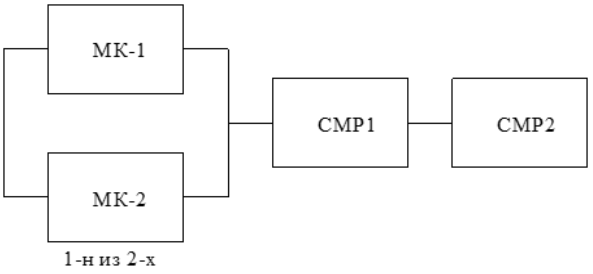


Рис. 1. Структурная схема пары РТ

Унифицированный модуль контроллера МК используется совместно со всеми силовыми модулями РТ, ЗРУ и СН (СМР, СМЗ и СМН) и структурно выполнен Таким образом, что позволяет управлять одновременно обоими подключенными к нему силовыми модулями, либо независимо каким-либо одним. На рис. 2 представлена структурная схема контроллера МК, где используются следующие обозначения:

– MPU – формирователь ШИМ-сигнала;

– К – схема контроллера;

– ИН – приемопередатчики информации;

– RG, РУ – регистры управления.

Для отключения сигналов управления, включая ШИМ-сигналы, а также переключения управляющих выходов МК на основной или резервный силовой модуль, сигналы МК передаются в силовые модули не непосредственно, а через промежуточные регистры, управление которыми производится от контроллера через специальные отказоустойчивые формирователи сигналов на транзисторах, выдающие единичный сигнал только при подаче на вход прямоугольных импульсов, что гарантирует от неправильного толкования сигнала при возникновении неисправностей на соответствующих портах микроконтроллера.

Связь между МК и АПМ осуществляется двумя каналами CAN-интерфейса с использованием приемопередатчиков сигналов CAN-протокола.

Перейдем к описанию силовой части модуля РТ.

Каждый силовой модуль СМР1 и СМР2 рассчитан на работу с одной из двух СБ и в свою очередь содержит основной (РТО) и резервный (РТР) регуляторы РТ [5]. В СМР обеспечивается диодная развязка наземного источника питания от СБ. Резервированные DCDC преобразователи обеспечивают напряжением +12 В, необходимым для работы драйверов.

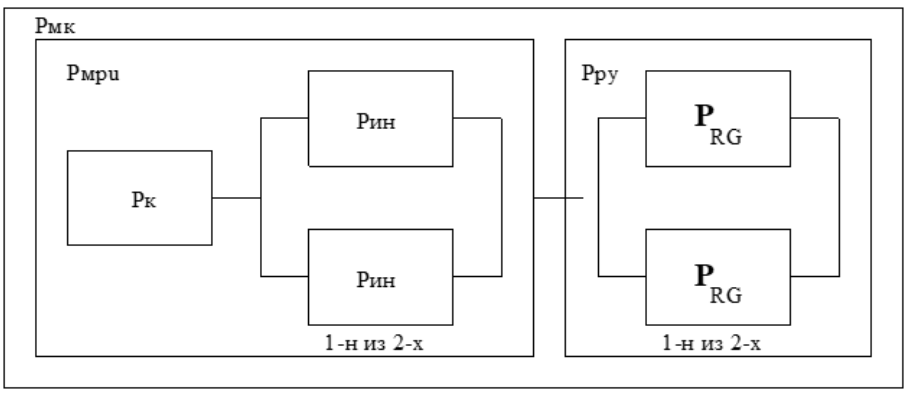


Рис. 2. Структурная схема унифицированного модуля контроллера МК

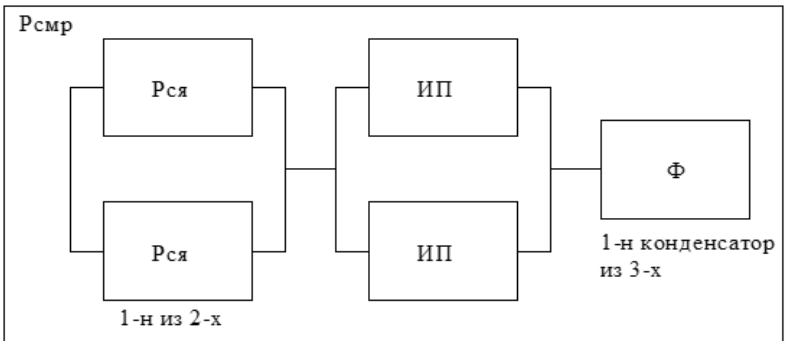


Рис. 3. Структурная схема силовой части РТ (СМР)

Предварительная фильтрация выходного напряжения осуществляется тремя конденсаторами с суммарной установочной емкостью 2000 мкФ, при этом допускается отказ одного конденсатора. Исключение из схемы конденсатора с коротким замыканием обеспечивают плавкие вставки – конструктивно выполненные в виде проводов ослабленного сечения или плавких предохранителей типа ВП1–2.

Структурная схема силовой части РТ представлена на рис. 3, где используются следующие обозначения:

– СЯ – силовой элемент РТ;

– ИП – источник питания РТ;

– Ф – фильтр из трех конденсаторов.

Описание и структурная схема для модуля ЗРУ

Теперь рассмотрим описание модуля ЗРУ. Данный модуль содержит основное и резервное устройства. Каждое устройство включает в свой состав:

– два силовых модуля устройства ЗРУ СМЗ-О (основной) и СМЗ-Р (резервный);

– два унифицированных контроллера МК-О и МК-Р;

– соединители для подключения к одной ЛИАБ.

Структурная схема для двух (основное и резервное) устройств модуля ЗРУ представлена на рис. 4.

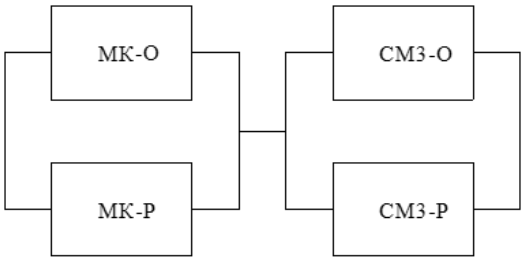


Рис. 4. Структурная схема основного и резервного устройств модуля ЗРУ

Структурное построение СМЗ и МК выполнено таким образом, что каждый МК может управлять любым СМ и обеспечивает синхронную работу основного и резервного СМЗ в режиме горячего резерва, что существенно повышает общую надежность модуля ЗРУ.

Цифровая схема управления МК ЗРУ унифицирована со схемой управления МК РТ и описана в предыдущем разделе, посвященном модулю РТ. Перейдем к описанию силовой части модуля ЗРУ.

Каждый силовой модуль ЗРУ СМЗ-О и СМЗ-Р рассчитаны на автономную работу с ЛИАБ, однако при штатной работе и отсутствии отказов оба СМ работают одновременно в режиме горячего резерва с одним и тем же уровнем ШИМ. Основой каждого СМЗ является дроссель [6], осуществляющий совместно с ключами, работающими в ШИМ-режиме заряд или разряд ЛИАБ.

Датчик тока ЛИАБ используется в процессе регулирования для измерения токов заряда и разряда ЛИАБ. DC-DC преобразователь обеспечивает напряжением +12 В, необходимым для работы драйверов.

Предварительная фильтрация выходного напряжения осуществляется четырьмя конденсаторами с суммарной установочной емкостью 2000 мкФ, при этом допускается отказ одного конденсатора. Исключение из схемы конденсатора с коротким замыканием обеспечивают плавкие вставки – конструктивно выполненные в виде проводов ослабленного сечения или плавких предохранителей типа ВП1-2.

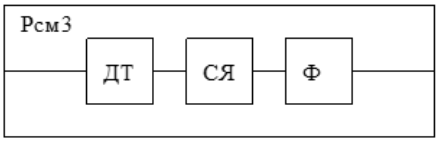


Рис. 5. Структурная схема силовой части модуля ЗРУ

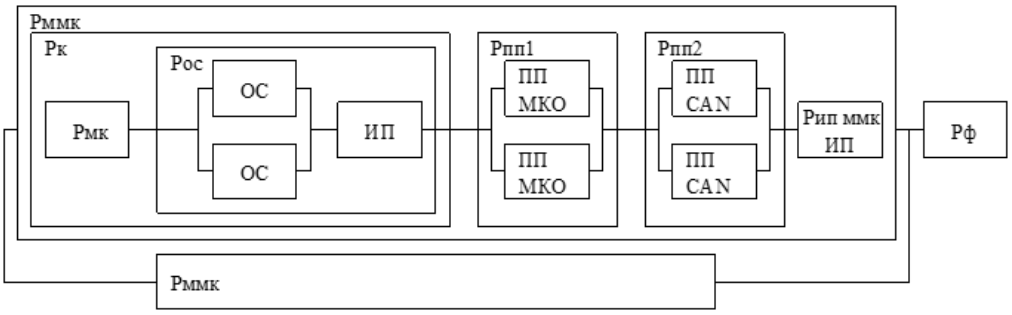


Рис. 6. Структурная схема АПМ

Структурная схема силовой части ЗРУ представлена на рис. 5, где используются следующие обозначения:

– СЯ – силовое устройство ЗРУ;

– ДТ – датчики тока ЛИАБ;

– Ф – выходной фильтр.

Описание и структурная схема для модуля АПМ

Перейдем к описанию модуля АПМ. Как писалось ранее, данный модуль используется для общего управления АРК, а также как коммуникационное устройство, обеспечивающее информационный обмен:

– между АРК и модулями РТ, ЗРУ, СН непосредственно;

– между АРК и МКУ ЛИАБ по 4-м каналам интерфейса CAN;

– АРК и БК по 4-м каналам интерфейса ГОСТ Р 52070–2003 (далее – МКО).

Как и все остальные модули АПМ содержит основной и резервный контроллер.

Модуль АПМ включает в свой состав [7]:

– два модуля (основной и резервный) микроконтроллера (ММК) ММК1 и ММК2;

– емкостной фильтр выходного напряжения, состоящий из 30 танталовых конденсаторов по 680 мкФ (пять модулей по пять конденсаторов, каждый из которых содержит плавкие вставки или плавкие предохранители типа ВП1–2);

– объединенную плюсовую шину нагрузки АРК с двумя датчиками тока для измерения тока нагрузки по двум направлениям передачи энергии в нагрузку;

– объединенную минусовую шину нагрузки АРК, она же цепь общего провода;

– три DC-DC преобразователя для питания ММК;

– концевые терминаторы 120 Ом линии CAN-интерфейса;

– соединители для подключения к внешним блокам и основному изделию.

Каждый ММК в свою очередь содержит [7]:

– непосредственно микроконтроллер;

– два датчика напряжения на шине нагрузки;

– приемопередатчики интерфейса CAN;

– приемопередатчики интерфейса МКО;

– источник опорного напряжения.

Структурная схема модуля АПМ представлена на рис. 6, где используются следующие обозначения:

– ИП – источник питания;

– ОС – операционный усилитель;

– ПП – приемопередатчик;

– Ф – емкостной фильтр.

С целью повышения надежности передачи информации оба интерфейса используют по два выхода на каждом контроллере (используют 4-канальные пары передачи информации), что гарантирует работоспособность обмена информацией при двух отказах в кабельной сети передачи информации.

Все функции регулирования РТ, ЗРУ, АПМ, а также диагностирования работы изделия, включая проверку работоспособности резерва, обмена информации и выполнения команд от БК возложены на микроконтроллеры в соответствии с заложенным в их памяти алгоритмом работы.

Описание и структурная схема для модуля СН

Наконец, рассмотрим описание модуля СН.

Данный модуль, в отличие от других остальных, предназначен как для повышения, так и понижения входного напряжения в режиме стабилизации напряжения на шине 28,5 В, и включает в свой состав:

– два силовых модуля устройства СН СМН1 (основной) и СМН2 (резервный);

– два унифицированных контроллера МК1 и МК2;

– соединители для подключения входных цепей энергопитания и подключения СН к шинам моноблока, а также для соединения с четырьмя каналами интерфейса CAN.

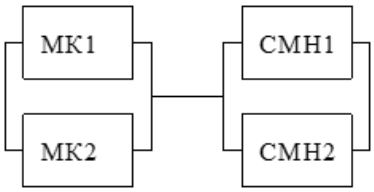


Рис. 7. Структурная схема модуля СН

Структурная схема модуля СН представлена на рис. 7.

Структурное построение СМН и МК выполнено Таким образом, что каждый МК может управлять любым СМ и обеспечивает синхронную работу основного и резервного СМН в режиме горячего резерва, что существенно повышает общую надежность модуля СН.

Цифровая схема управления МК СН унифицирована со схемой управления МК РТ и описана ранее в разделе, посвященном модулю РТ. Перейдем к описанию силовой части модуля СН.

Каждый силовой модуль стабилизатора напряжения СМН1 и СМН2 рассчитан на автономную работу с требуемой нагрузкой, однако при штатной работе и отсутствии отказов оба СМ работают одновременно в режиме горячего резерва с одним и тем же уровнем ШИМ.

Основой каждого СМ является дроссель, осуществляющий совместно с ключами, работающими в ШИМ-режиме, повышение или понижение выходного напряжения и его стабилизацию на уровне 28,5 В.

DC-DC преобразователи обеспечивают напряжениями +12 В, необходимыми для работы драйверов последовательного и параллельного ключа соответственно.

Для предварительной фильтрации выходного напряжения используются четыре конденсатора, при этом допускается отказ одного конденсатора из четырех; защита от короткого замыкания в конденсаторах осуществляется плавкими вставками в виде проводов ослабленного сечения или плавких предохранителей типа ВП1–2.

Структурная схема силовой части модуля СН схожа со структурной схемой силовой части модуля ЗРУ, которая была представлена ранее на рис. 5.

Стоит сказать, что на этапе работы КА совместно с ОПС АРК должна принимать дополнительно электроэнергию от нее, что обеспечивает СН. Отказом здесь будет являться отсутствие передачи энергии ОПС на шину 28,5 В.

Теперь, когда каждый модуль описан, перейдем к результатам расчета ВБР АРК.

Расчет вероятности безотказной работы АРК

Время безотказной работы структурных элементов распределяется по экспоненциальному закону [8]. Формула (1) определения ВБР для экспоненциального закона имеет вид

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где λ – интенсивность отказов; t – время эксплуатации.

При экспоненциальном законе надежности предполагается, что интенсивность отказов является величиной постоянной. Суммарная эксплуатационная интенсивность отказов электрорадиоэлементов (ЭРИ) определяется по формуле (2)

$$\lambda_{Э} = \lambda_{б} \sum_{i=1}^{n} K_i, \quad (2)$$

где $\lambda_{б}$ – базовая интенсивность отказов типа (группы) ЭРИ; K_i – коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов; n – число учитываемых факторов. В зависимости от типа ЭРИ могут быть использованы следующие коэффициенты:

– $К_{Р}$ – коэффициент режима;

– $К_{ПР}$ – коэффициент приемки;

– $К_{Э}$ – коэффициент эксплуатации;

– $К_{а}$ – коэффициент качества производства продукции;

– $К_{С}$ – коэффициент величины емкости;

– $К_{ПС}$ – коэффициент величины последовательно включенного с оксидно-полупроводниковым конденсатором активного сопротивления;

– $К_{R}$ – коэффициент величины омического сопротивления;

– $К_{М}$ – коэффициент величины номинальной мощности;

– $К_{стаб}$ – коэффициент точности изготовления (допуск) резистора;

– $К_{ф}$ – коэффициент функционального назначения прибора;

– $К_{s}$ – коэффициент отношения рабочего напряжения к максимально допустимому напряжению по ТУ;

– $К_{дн}$ – коэффициент максимально допустимой (установленной в техническом условии) нагрузки по мощности рассеяния (току);

– $К_{ст}$ – коэффициент сложности интегральной схемы и температуры окружающей среды;

– $К_{корп}$ – коэффициент типа корпуса интегральной схемы;

Таблица 1

Значения параметров интенсивности отказов

Участок схемы	Параметр интенсивности отказов $\lambda \cdot 10^6$, 1/ч
Контроллер МК для модулей РТ, ЗРУ и СН	1,9423
Приемопередатчик МК для модулей РТ, ЗРУ и СН	0,302
Регистры управления МК для модулей РТ, ЗРУ и СН	0,465
Источник питания СМ для модулей РТ, ЗРУ и СН	0,338
Силовая часть модуля РТ	1,237
Силовая часть модуля ЗРУ	2,48
Силовая часть модуля СН	2,21
Контроллер ММК модуля АПМ	1,1
Устройства ОС модуля АПМ	0,254
Источник питания ОС модуля АПМ	0,461
Приемопередатчик МКО модуля АПМ	0,453
Приемопередатчик CAN модуля АПМ	0,127
Источник питания ММК модуля АПМ	0,127

– $К_V$ – коэффициент величины напряжения питания для КМОП-микросхем;

– $К_{КК}$ – коэффициент величины задействованных контактов;

– $К_{КС}$ – коэффициент количества сочленений-расчленений в течение всего времени эксплуатации;

– $К_f$ – коэффициент количества коммутаций в час.

Значение коэффициентов и интенсивностей отказов для различных ЭРИ приведены в справочной литературе [9], которая является официальным изданием Министерства обороны.

Суммируя интенсивность отказов отдельных ЭРИ, были получены значения параметра интенсивности отказов для различных участков схем модулей АРК, которые представлены в табл. 1.

Расчет ВБР при последовательном (3) и параллельном (4) соединении элементов на структурной схеме производится по следующим формулам

$$P_{пос}(t) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t), \quad (3)$$

$$P_{пар}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} \left(1 - P_i(t)\right), \quad (4)$$

где n – количество элементов.

Результаты расчета ВБР пары и четырех РТ в течение 24 ч, 120 ч, 720 ч и 8760 ч сведены в табл. 2.

Результаты расчета ВБР одного и четырех ЗРУ в течение 24 ч, 120 ч, 720 ч и 8760 ч сведены в табл. 3.

Результаты расчета ВБР АПМ в течение 24 ч, 120 ч, 720 ч и 8760 ч сведены в табл. 4.

Таблица 2

Результаты расчета ВБР для модуля РТ

	$P(24)$	$P(120)$	$P(720)$	$P(8760)$
$P_К$	0,999934	0,999757	0,998603	0,983129
$P_{ИН}$	0,9999928	0,999947	0,999783	0,997358
P_{RG}	0,999989	0,999944	0,999665	0,996352
$P_M P_U$	0,999933	0,999766	0,9998602	0,983116
$PP_У$	0,9999999999	0,999999996	0,999999	0,999986
$P_{МК}$	0,999934	0,999767	0,998602	0,983115
$\Sigma P_{МК}$	0,99999999	0,9999999	0,999998	0,999715
$P_{СЯ}$	0,999970	0,999852	0,999110	0,989222
$P_{ИП}$	0,999992	0,999959	0,999339	0,997347
$P_Ф$	0,9999999999	0,9999999999	0,999999996	0,9999997
$\Sigma P_{СЯ}$	0,999999998	0,9999998	0,9999992	0,999893
$\Sigma P_{ИП}$	0,9999999999	0,999999998	0,9999995	0,999993
$P_{СМ} P$	0,999999998	0,9999998	0,999999	0,999886
$P_{пара} P_Т$	0,99999998	0,9999995	0,999996	0,999487
$P_{четыре} P_Т$	0,9999998	0,999999	0,999992	0,998974

Таблица 3

Результаты расчета ВБР для модуля ЗРУ

	$P(24)$	$P(120)$	$P(720)$	$P(8760)$
$P_{МК}$	0,99999999	0,9999999	0,999998	0,999715
$P_{Ф}$	0,99999999	0,99999999	0,99999999	0,9999998
$P_{СЯ}$	0,9999405	0,9997024	0,99821599	0,98069596
$P_{ДТ}$	0,9999969	0,999984	0,999964	0,998862
$P_{СМЗ}$	0,999937	0,999686	0,998216	0,979580
$\Sigma P_{СМЗ}$	0,99999999	0,9999998	0,9999967	0,999577
$P_{один\ З}P_{У}$	0,999999944	0,99999916	0,9999947	0,999293
$P_{четыре\ З}P_{У}$	0,99999978	0,9999966	0,999974	0,997175

Таблица 4

Результаты расчета ВБР для модуля АПМ

	$P(24)$	$P(120)$	$P(720)$	$P(8760)$
$P_{МК}$	0,9999736	0,999868	0,999208	0,990416
$P_{ОС}$	0,999999999	0,999999998	0,99999993	0,999991
$P_{ИП\ ОС}$	0,9999889	0,9999447	0,999668	0,9959698
$P_{К}$	0,9999625	0,9998127	0,9988762	0,986416
$P_{ПП\ МКО}$	0,999999999	0,999999996	0,9999999	0,999984
$P_{ПП\ CAN}$	0,999999999	0,999999999	0,99999999	0,9999987
$P_{ИП\ ММК}$	0,99999696	0,9999843	0,9999086	0,9988881
$P_{ММК}$	0,9999595	0,999797	0,998785	0,985302
$\Sigma P_{ММК}$	0,9999999996	0,999999996	0,9999998	0,99978396
$P_{С}P$	0,99999999985	0,9999999995	0,99999998	0,9999985
$P_{АПК}$	0,999999995	0,99999996	0,999998	0,999782

Результаты расчета ВБР СН в течение 8760 ч выглядят следующим образом (57):

$$P_{СМН}\left(8760\right) = 0{,}980818, \quad (5)$$

$$P_{МК}\left(8760\right) = 0{,}983115, \quad (6)$$

$$P_{СН}\left(8760\right) = 0{,}99935. \quad (7)$$

Окончательные результаты расчета ВБР для АРК при выполнении функции «Формирование и передача энергии в АРК» на разных этапах эксплуатации в течение 24 ч, 120 ч, 720 ч и 8760 ч сведены в табл. 5.

Заключение

В данной статье был рассмотрен способ повышения надежности ВБР АРК бортовой сети КА. Сначала были приведены описания модулей АРК, разработаны логические структурные схемы на основе приведенных описаний. Далее

Таблица 5

Результаты расчета ВБР АРК

	$P(24)$	$P(120)$	$P(720)$	$P(8760)$
$PP_{Т}$	0,9999998	0,999999	0,999992	0,998974
$P_{З}P_{У}$	0,99999978	0,9999966	0,999974	0,997175
$P_{АПК}$	0,999999995	0,99999996	0,999998	0,999782
$P_{А}P_{К}$ (автономный полет (доставка))	-	0,9999956	0,999966	-
$P_{А}P_{К}$ (полет в составе ОПС)	-	-	-	0,99594
$P_{СН}$	-	-	-	0,99935
$P_{А}P_{К}$ (полет в составе ОПС с дополнением энергией)	-	-	-	0,99529
$P_{А}P_{К}$ (автономный полет после расстыковки)	0,9999978	-	-	-

были получены значения параметра интенсивности отказов элементов для составляющих приведенных логических схем расчета надежности.

В конце были приведены результаты расчета ВБР для каждого модуля, а затем и для самого АРК при выполнении функции «Формирование и передача энергии в АРК» на разных этапах эксплуатации в течение 24 ч, 120 ч, 720 ч и 8760 ч в виде таблицы.

Согласно полученным в табл. 5 результатам расчета можно сказать, что данная разрабатываемая АРК в настоящее время отвечает требованиям надежности для будущего применения в эксплуатации в бортовой сети КА.

Список источников

1. *Таболин И. И., Кузьменко Р. Ю., Данилов А. Д.* Реализация зонного принципа в системе управления аппаратурой регулирования и контроля бортовой сети космического аппарата // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 5. С. 41–46.

2. *Таболин И. И., Данилов А. Д.* Реализация зонного принципа работы аппаратуры регулирования и контроля бортовой энергосистемы космического аппарата // Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы VI Всерос. (XXXIX Региональной) научно-техн. конф., посвящается 100-летию плана ГОЭЛРО, Нижний Новгород, 17–18 декабря 2020 года. Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, 2020. С. 132–135.

3. *Таболин И. И., Данилов А. Д.* Разработка структуры аппаратуры регулирования и контроля системы энергоснабжения космического аппарата // Альтернативная и интеллектуальная энергетика: Материалы II Междунар. научно-практ. конф., Воронеж, 16–18 сентября 2020 года. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2020. С. 216–217.

4. *Таболин И. И., Кузьменко Р. Ю., Данилов А. Д.* Разработка математической модели модуля регулятора тока в системе управления аппаратуры регулирования и контроля бортовой сети космического аппарата // Завалишинские чтения '22: сб. докладов XVII Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике. Санкт-Петербург, 12–14 апреля 2022 года. СПб.: ГУАП, 2022. С. 97–102.

5. *Таболин И. И., Кузьменко Р. Ю., Данилов А. Д.* Выбор технического решения регулятора мощности солнечной батареи для аппаратуры регулирования и контроля бортовой сети комического аппарата // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. научно-техн. статей. Нижний Новгород, 22 декабря 2022 года. Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, 2022. С. 44–49.

6. *Tabolin I., Kuzmenko R., Danilov A.* Selection Of A Technical Solution For A Charge-Discharge Device Of Rechargeable Battery In Regulation And Monitoring Equipment Of Spacecraft Onboard Network // Modern informatization problems in simulation and social technologies (MIP–2023'SCT): Proceedings of the XXVIII-th International Open Science Conference (Yelm, WA, USA, January 2023) – Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2023. P. 94–97.

7. *Таболин И. И., Кузьменко Р. Ю., Данилов А. Д.* Модуль микроконтроллера в системе автоматического регулирования и контроля энергоснабжения бортовой сети космического аппарата // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: Труды Международной научно-технической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора Зайцева Александра Ивановича. Воронеж, 21–23 ноября 2019 года. Воронеж: 2019. С. 140–144.

8. Методы расчета показателей надежности ОСТ4.ТО.012242-84.

9. Единый справочник «Надежности ЭРИ», 2006.

УДК 681.5.032 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-275-279**

В. Ф. Шишлаков*
доктор технических наук, профессор
Д. С. Положенцев*
старший преподаватель
А. А. Михайлова*
магистрант
Т. Д. Куликова*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МЕТОД ОЦЕНКИ ПЛАВНОСТИ УГЛОВОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НИЗКОСКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Описана проблематика количественной оценки плавности углового перемещения исполнительной оси электроприводов, предназначенных для отработки инфранизких угловых скоростей вращения. Рассмотрены существующие способы оценки плавности и неравномерности перемещения, а также указаны их основные недостатки применительно к рассматриваемым электроприводам. Предложен способ оценки плавности, разработанный на основе отклонения измеренного положения исполнительной оси от ее положения при идеально-плавном линейном перемещении.
Ключевые слова: *плавность, неравномерность вращения, электропривод, инфранизкая скорость вращения, система управления.*

V. F. Shishlakov*
Dr. Sc. Tech., Professor
D. S. Polozhentcev*
Senior Lecturer
A. A. Mikhailova*
Postgraduate Student
T. D. Kulikova*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

METHOD FOR ASSESING THE SMOOTHNESS OF ANGULAR MOVEMENT LOW VELOCITY ELECTRIC DRIVES

The article describes the problems of quantitative assessment of the angular movement smoothness of the executive axis of electric drives, designed for create infra-low angular velocity of rotation. The existing methods for assessing the smoothness and irregularity of movement are considered, as well as their main shortcomings in relation to the considered electric drives. A method for evaluating smoothness is proposed, developed on the basis of the deviation of the measured position of the executive axis from its position during ideally smooth linear movement.
Keywords: *rotational smoothness, rotational irregularity, electric drive, infra-low rotation velocity, control system.*

В настоящее время можно выделить ряд прецизионных электроприводов, работающих в режиме отработки инфранизких угловых скоростей вращения, например, управляющий электропривод солнечной батареи космического аппарата [1], исполнительный электропривод силового гироскопического комплекса [2], электропривод системы стабилизации телескопа [3] и др. Основным режимом этих электроприводов является вращение исполнительной оси (ИО) с угловыми скоростями от десятков до тысячных долей градуса в секунду.

Проектирование электроприводов такого рода предполагает введение (в дополнение к «классическим», таким как точность, перерегулирование и т. д.) показателя, позволяющего численно оценивать такое качество движения ИО, как плавность. Тем не менее понятие плавности как меры неравномерности движения, несмотря на многие попытки исследователей, не нашло в литературе однозначного общепри-

знанного определения [4]. При этом на плавность вращения ИО оказывают влияние многие составные части электропривода. Например, неравномерность вращения ИО редукторной передачи возникает вследствие технологических погрешностей ее изготовления, а также связана с рядом конструктивных факторов, закладываемых при разработке. В [5] указаны основные параметры редукторных передач (и их составных частей) оказывающие влияние на плавность хода ИО, такие как: тип зубчатой передачи, ее модуль, угол зацепления, модификация зуба, величина резонансной частоты, вязкость смазки и так далее. Также значительное влияние на плавность вращения ИО электроприводов, функционирующих в режиме отработки инфранизких скоростей, оказывает дискретность датчика обратной связи.

На сегодняшний день можно выделить следующие способы оценки плавности (или неравномерности) [6]:

Широкое применение получил способ, основанный на коэффициенте неравномерности

$$\delta = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{v_{cp}},$$

где $v_{\max}$, $v_{\min}$, v_{cp} – наибольшее, наименьшее и среднее значения скоростей за цикл. Однако использование средней скорости v_{cp} в качестве эталонной модели, не является правильным, так как она может равняться нулю и зависит от внешних воздействий (возмущений). В ряде задач вместо v_{cp} целесообразней применять заданное значение скорости v_0

$$\delta = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{v_0}.$$

Коэффициент неравномерности является относительным размахом колебаний скорости, поэтому имеет главный недостаток, который заключается в том, что он не может оценить частоту неравномерности движения, а оценивает лишь среднюю амплитуду колебаний.

Также известен способ, количественно оценивающий оценивать плавность движения по двум показателям. В данном случае мерой плавности сигнала является полная ее вариация на определенном интервале. Сумма значений отклонений от монотонной функции представляет собой полную вариацию

$$Var_b^a f = \sup_T \sum_k \left| f(t_k) - f(t_{k-1}) \right|,$$

где T – произвольное разбиение интервала $[a, b]$ на подинтервалы $[t_k, t_{k-1}]$; $\sup_T \Sigma_k$ – точная верхняя грань суммы по всем возможным разбиениям.

Первым показателем плавности I_1 является отношение вариации скорости $v(t)$ на интервале, к заданному значению скорости $v_0(t)$ на этом же интервале

$$I_1 = \frac{\tau_0}{T} \frac{Var\ v}{v_0} = \frac{\tau_0}{T} \int_0^T \frac{|\dot{v}(t)|}{v_0} dt,$$

где T – время наблюдения; τ_0 – некоторая постоянная времени, необходимая для приведения выражения к безразмерной величине.

Второй показатель плавности I_2 определяется, как отношение полной вариации ускорения $a(t)$ на интервале, к заданному значению скорости $v_0(t)$ на этом же интервале

$$I_2 = \frac{\tau_0^2}{T} \frac{Var\ a}{v_0} = \frac{H^2}{T} \int_0^T \frac{|\dot{a}(t)|}{v_0^3} dt,$$

где $\tau_0 = H/v_0$ – постоянная времени, необходимая для приведения выражения к безразмерной величине; H – интервал, который не превосходит допустимый диапазон движения.

Несмотря на то, что данная оценка плавности нашла применение при проектировании систем управления, она обладает некоторыми ограничениями при ее использовании. Видно, что для получения первого и второго показателя плавности необходима информация о производных угловой скорости и углового ускорения.

Разработка систем управления электроприводов, работающих в режиме инфранизкой угловой скорости, является сложной задачей, ведь датчики для измерения подобных угловых скоростей с требуемыми точностью, дискретностью и быстродействием, практически отсутствуют на рынке. В низкоскоростном электроприводе информация об угловой скорости может быть получена с помощью датчика углового положения (ДУП) с высокой разрешающей способностью. Высокая разрядность позволяет проводить прецизионную оценку угловой скорости ИО и исключить необходимость применения тахогенераторов, лазерных гироскопов и иных измерителей угловой скорости. Поэтому во многих задачах управления прослеживается тенденция к использованию в системе одного вида датчика обратной связи – углового [7]. Однако большие габариты и масса таких датчиков накладывает ограничение на их использование в устройствах, к габаритно-массовым характеристикам которых предъявляются высокие требования.

Основная идея организации системы управления угловой скоростью с помощью ДУП с не

высокой разрешающей способностью, состоит в интегрировании задающего скорость сигнала и последующей работе электропривода в режиме следящей системы по угловому положению. За счет такого построения системы имеется возможность плавно управлять ИО на скоростях вплоть до тысячных долей градуса в секунду [2]. Однако при этом в системе управления отсутствует информация об угловой скорости и ее производных.

В качестве примера рассмотрим диаграммы изменения углового положения рамки силового гироскопа при работе двух различных систем управления, представленные на рис. 1. При записи данных диаграмм использовался 19-разрядный ДУП (дискретность измерения составляет 2,47″). Видно, что изменение углового положения, представленное на диаграмме *б* происходит более плавно, чем представленное на диаграмме *а*, однако ввиду отсутствия информации об угловой скорости и ее производной провести количественную оценку плавности данных перемещений не представляется возможным.

Таким образом, может быть сформулирована следующая задача: необходимо разработать такой метод оценки плавности движения ИО, который не требует информации о производных ее углового положения.

Для определения плавности было предложено опереться на механизм анализа погрешностей измерения углового положения ИО и оценивать средние значения этих погрешностей. Как известно, сама погрешность определяется по формуле [8]

$$\Delta_i = \left| x_{i_\text{изм}} - x_{i_\text{ф}} \right|,$$

где Δ_i – величина погрешности i-го измерения; $x_{i_\text{изм}}$ – измеренное значение; $x_{i_\text{ф}}$. фактическое (истинное) значение.

В качестве фактического значения предлагается использовать «теоретические» значения углового положения ИО при идеально-плавном линейном перемещении. Для расчета набора таких значений может быть использован метод наименьших квадратов и построена апроксимирующая прямая (линия тренда 1 порядка). Прямая определяется коэффициентами a и b, которые могут быть рассчитаны по имеющимся данным об измеренном угловом положении.

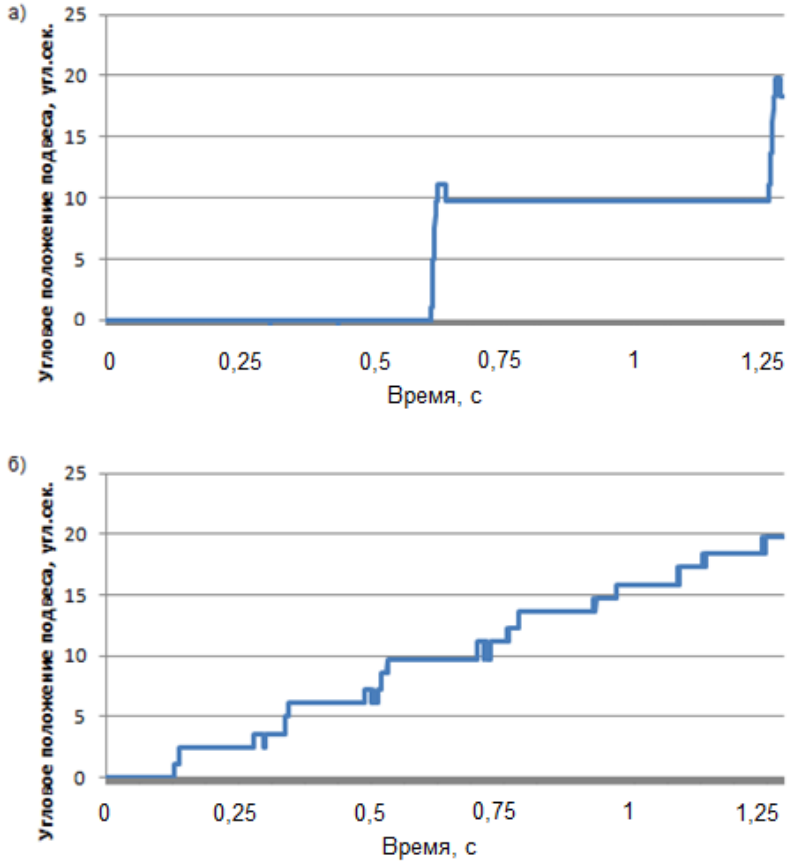


Рис. 1. Диаграммы углового положения ИО

Первоначально для каждой точки (x, y) высчитывается x^2 и xy, а затем находим суммы $\sum x_i$, $\sum y_i$, $\sum x_i^2$, $\sum x_i y_i$. Из полученных сумм рассчитываются значения коэффициентов a и b так, чтобы сумма квадратов отклонений принимала минимальное значение [9]

$$a = \frac{N\sum(x_i y_i) - \sum x_i \sum y_i}{N\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2},$$

$$b = \frac{\sum y_i - a\sum x_i}{N},$$

где N – количество точек.

На рис. 2 представлены диаграммы углового положения ИО с наложенными на них аппроксимирующими прямыми.

Таким образом, может быть получен массив значений погрешности для идеально-плавного линейного перемещения. Наиболее распространены четыре вида средних значений погрешности [9]:

1) средняя арифметическая погрешность:

$$\Delta_{\text{ср.ар.}} = \frac{\sum|\Delta_i|}{n},$$

где Δ_i – все значения погрешностей: n – объем выборки (число измерений);

2) средняя гармоническая погрешность:

$$\Delta_{\text{гарм}} = \frac{n}{\sum\frac{1}{\Delta_i}};$$

3) средняя геометрическая погрешность:

$$\ddot{A}_{\text{геом}} = \sqrt[n]{\prod \Delta_i};$$

4) средняя квадратическая погрешность:

$$\Delta_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n}}.$$

Поскольку информация об угловом положении носит дискретный характер, то величина Δ_i может обращаться в 0, что затрудняет расчет средних гармонической и геометрической погрешностей. В связи с этим в рамках дальнейшего исследования было решено использовать только арифметическую и среднеквадратическая погрешности, которые были рассчитаны для исследуемых диаграмм углового положения, полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Рассчитанные средние погрешности

	Средняя арифметическая погрешность, ‘’	Средняя квадратическая Погрешность, ‘’
Диаграмма (а)	2,1174	2,562
Диаграмма (б)	0,5547	0,6857

Видно, что значение погрешности углового перемещение для диаграммы *а* выше, чем для диаграммы *б*, что соответствует визуальной оценке этих диаграмм. Однако данный метод оценки плавности имеет следующие недостатки:

– плавность никак не связана с угловой скоростью вращения – невозможно сравнивать плавность вращения ИО при различных угловых скоростях;

– описанный способ оценивает неравномерность движения, а не плавность.

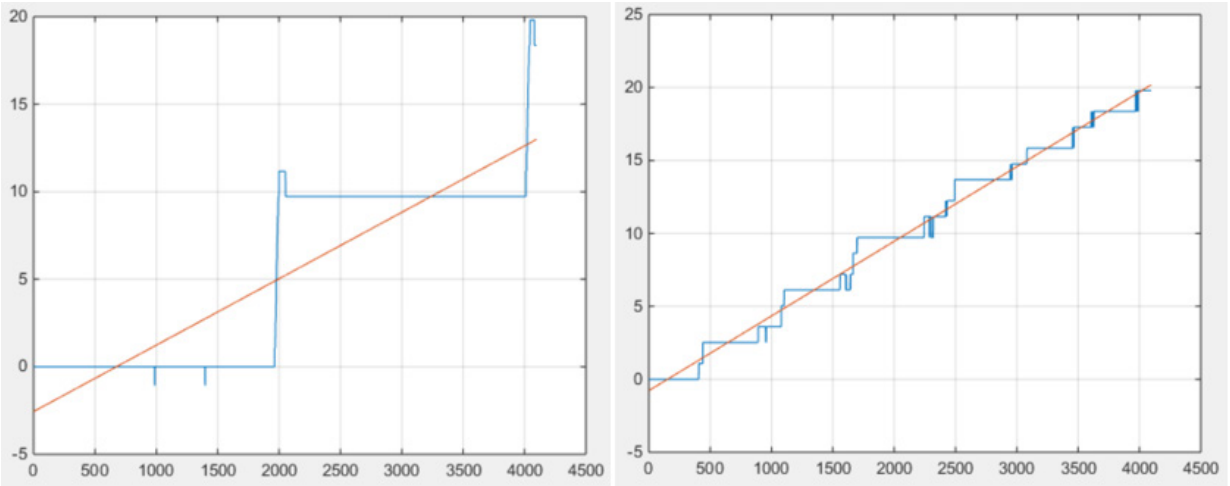


Рис. 2. Линии тренда для диаграмм углового положения ИО

Для того чтобы перейти от оценки неравномерности углового перемещения к плавности, достаточно взять обратную величину. Таким образом, получим среднеквадратический и среднеарифметический показатели плавности

$$\rho_{ср.кв.} = \sqrt{\frac{n}{\sum \Delta_i^2}},\ \rho_{\text{ср.ар.}} = \frac{n}{\sum |\Delta_i|}.$$

Для того чтобы проводить оценку плавности независимо от угловой скорости вращения ИО, предлагается ввести в формулы расчета величину углового перемещения, на котором производится оценка ($\Delta\alpha$)

$$\rho_{ср.кв.} = \sqrt{\frac{(\Delta\alpha)^2}{\sum \Delta_i^2}},\ \rho_{\text{ср.ар.}} = \frac{\Delta\alpha}{\sum |\Delta_i|}.$$

Это позволяет оценивать плавность как безразмерную величину и дает возможность достоверно проводить сравнение плавностей перемещения для различных угловых скоростей между собой.

Таблица 2

Рассчитанная плавность

	Средняя арифметическая плавность	Средняя квадратическая плавность
Диаграмма (а)	0,0023	0,0273
Диаграмма (б)	0,0088	0,1019

Видно, что рассчитанные значения плавности для углового перемещение диаграммы *а* ниже, чем для диаграммы *б*, что соответствует визуальной оценке этих диаграмм. Таким образом, можно говорить о том, что предложенный способ оценки, с одной стороны дает адекватную численную оценку плавности углового перемещения, а с другой – не требует информации о производных ее углового положения. Однако этот способ обладает недостатками и требует проведения дополнительных исследований. Полученная оценка плавности может изменяться от 0 до ∞, для более удобного восприятия необходимо нормирование данной величины – формулы оценки должны быть доработаны. Также необходимо провести исследования, показывающие какое количество измерений необходимо для получения качественной оценки плавности на определенном интервале углового перемещения.

Список источников

1. *Положенцев Д. С., Джукич Д. Й., Захаров Д. Н.* Система управления исполнительного электропривода устройства поворотного солнечной батареи комического аппарата // Омский научный вестник. 2019. № 5 (167). С. 72–76.

2. *Якимовский Д. О., Положенцев Д. С., Джукич Д. Й.* Исполнительный электропривод перспективного силового гироскопического комплекса // Доклады ТУСУР. 2018. № 3. С. 103–108.

3. *Толмачев В. А., Субботин Д. А.* Синтез системы управления электропривода сканирующей оси инфракрасного телескопа // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 5 (75). С. 53–57.

4. *Новикова Е. А.* Обоснование критериев плавности мехатронных приводов поступательного движения // Фундаментальные исследования. 2012. № 3. С. 123–128.

5. *Карпенко А. Б.* Обеспечение плавности вращения редуктора // Качество и жизнь. 2021. № 4. С. 77–81.

6. *Морозов В. В., Костерин А. Б., Новикова Е. А.* Плавность динамических звеньев электромеханических приводов / Под. ред. В. В. Морозова. Владимир, 1999. 158 с.

7. *Садовников М. А.* Измерение скорости движения силового электропривода с помощью оптических датчиков угла // Известия высших учебных заведении. Приборостроение. 2008. № 6. С. 52–57.

8. *Рубцова С. В., Охрименко О. И., Алейникова О. А.* Основы теории погрешностей учеб.метод. пособие для обучающихся. Шахты: ИСОиП (филиал) ДГТУ в г. Шахты, 2019. 66 с.

9. *Коломиец Л. В., Поникарова Н. Ю.* Метод наименьших квадратов метод. указания. Самара, 2017. 32 с.

УДК 621.7.077 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-280-282**

М. Д. Яушкина*
магистрант
А. В. Рысин*
старший преподаватель, аспирант
С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Рассмотрены кинематики движения мобильных роботов и динамика движения для робота лягушки. Основными методами исследования стали теоретическое исследование существующих кинематик движения, определения подходящей конструкции, удовлетворяющей требованиям технического задания. В результате работы были выделены подходящие конструкции, позволяющие осуществлять передвижения робота на подобии передвижения лягушки.
Ключевые слова: *модульный мобильный робот, кинематика движения, динамика движения, робот-лягушка, робот разведчик.*

M. D. Yaushkina*
Postgraduate Student
A. V. Rysin*
Senior Lecturer, PhD Student
S. V. Solyonyj*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

KINEMATICS AND MOTION DYNAMICS OF A MOBILE ROBOT

The kinematics of the movement of mobile robots and the dynamics of movement for the frog robot are considered. The main research methods were the theoretical study of the existing kinematics of motion, the determination of a suitable design that meets the requirements of the technical specifications. As a result of the work, suitable structures were identified that allow the robot to move like a frog.
Keywords: *Modular mobile robot, motion kinematics, motion dynamics, frog robot, reconnaissance robot.*

Одной из основных задач в мобильной робототехнике является эффективное передвижение, которое возможно осуществлять на любых типах местности и при этом быть максимально энергоэффективными. Некоторые животные и насекомые используют прыжки для передвижения и могут преодолевать препятствия, размеры которых существенно больше, чем размеры собственного тела. Объектом исследования является модульный мобильный робот, осуществляющий передвижение с помощью прыжков, подобно лягушке. Создание роботизированных систем с помощью существующих в природе принципов движения открывает много новых возможностей, однако необходимо решить несколько сложных задач, главной из которых является координация положения робота во время процесса передвижения.

Преимущество использование «ног», в качестве опоры робота, по сравнению с колесами, заключается в том, что они обеспечивают улучшенное сцепление с грунтом и позволяют адаптироваться к ландшафту. Стратегия движения «пауза и прыжок» может использоваться для преодоления больших препятствий. Она состоит из сильного прыжка, который сменяется фазой паузы, когда исполнительные устройства перезаряжаются для следующего прыжка. Это позволяет роботу преодолевать сравнительно большие препятствия, которые были бы невозможны при стратегии передвижения на ногах или на колесах.

Для эффективного и стабильного передвижения роботизированной лягушки необходимо следить за траекториями движения туловища и каждого привода в ногах робота. Прямая кинематика помогает определить положение суставов робота для заданных углов сустава. Обратная кинематика помогает найти область допустимых значений углов между суставами, необ-

ходимых для выполнения прыжка. Понимание конструкции робота-лягушки является необходимым условием для понимания задачи обратной кинематики [1].

Роботизированная лягушка состоит из двух основных частей: системы передвижения и корпуса с электроникой и датчиками. В корпусе робота находятся аккумулятор, электроника, два сервопривода для взведения и срабатывания четырехзвенного пружинно-рычажного механизма, червячной передачи для увеличения момента и храпового механизма. Передние конечности, прикрепленные к телу, короткие и пассивные, соединенные с пружинами растяжения, которые поддерживают и поглощают удары при приземлении. Каркас тела прикреплен к длинными задними ногами, имеющими три активных сустава, а именно тазобедренный, коленный и голеностопный суставы. Эти три шарнира оснащены бесколлекторными двигателями для осуществления разгибания ног.

Мы можем упростить всю конструкцию робота, соединив шарниры задних ног простыми звеньями и рассматривая остальные части как единое целое, так как части его неподвижны по отношению к телу робота. Для начала прыжка задние ноги выпрямляются для достижения требуемой стойки. Вытягивание задних ног не может быть случайным, так как это влияет на устойчивость и стабильность робота. Исследование кинематики ноги робота необходимо для определения подходящих совместных траекторий [2].

Прямая кинематика – это вычисление положения и ориентации суставов робота в зависимости от углов их сочленения. Имеются ряд допущений в модели робота. Поскольку передние ноги пассивны, они и основное тело считаются единое тело. Задние ноги видоизменены в звенья, но они лежат в одной плоскости. Стопа считается закрепленной на земле.

Обратная кинематика – это подобласть кинематики, которая, в отличие от прямой кинематики, рассчитывает движения, необходимые для достижения желаемого положения. Есть несколько методов расчета обратной кинематики.

Метод якобиана Якобиан – это производная вектора по отношению к другому вектору. Предположим, что θ представляет текущие степени свободы сустава, а A представляет собой текущие степени свободы сустава. Функция прямой кинематики выглядит как $A=f(\theta)$.

Якобиан представляет собой линейную аппроксимацию f или матрицы частных производных, причем каждая частная производная представляет собой комбинацию компонентов векторов. Мы можем использовать якобиан только как аппроксимацию. Поэтому необходимо повторить процесс вычисления якобиана. Якобианская матрица определяется как

$$J = \begin{Bmatrix} \frac{\partial A_x}{\partial \theta_1} \frac{\partial A_x}{\partial \theta_2} \dots \frac{\partial A_x}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial A_y}{\partial \theta_1} \frac{\partial A_z}{\partial \theta_2} \dots \frac{\partial A_y}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial A_z}{\partial \theta_1} \frac{\partial A_z}{\partial \theta_2} \dots \frac{\partial A_z}{\partial \theta_n} \end{Bmatrix},$$

где A_x, A_y, A_z – координаты x, y, z рабочего органа соответственно; θ_i – угол поворота i-го шарнира.

Решение, полученное методом якобиана это полученные углы сочленения суставов. Математически результаты достаточно точны, но они не могут быть реализованы в роботе из-за физических ограничений, поэтому рассмотрим следующий метод – искусственные нейронные сети (ИНС) [3].

ИНС – это способ обработки информации, основанная на том же методе, как биологические нервные клетки обрабатывают информацию. Ключевым элементом этой парадигмы является новая структура системы обработки информации. Он состоит из большого количества взаимосвязанных обрабатывающих элементов (нейронов), работающих единовременно для решения конкретных задач.

Топология проектируемой сети состоит из трех слоев, один из которых является скрытым слоем, представленным для хранения внутреннего представления. Выход единиц в слое A умножается на соответствующие веса W_{ij}, и они подаются в качестве входных данных для скрытого слоя.

Чтобы ИНС функционировала должным образом, то есть давала ожидаемые результаты, ее обучение должно быть эффективным. Разработанный обучающий набор должен иметь все возможные комбинации углов сустава для каждой точки, достижимой концевым эффектором в его области. Сеть обучается на всех возможных комбинациях углов соединения с шагом 5 º в каждом угле. Основная цель состоит в том, чтобы заставить сустав двигаться и следовать определенной траектории. В этом случае мы заставляем его следовать по линии, которая начинается от начальной точки рабочего органа, то есть когда он находится в исходной конфигурации и находится под углом к горизонтали. Подобная сеть может быть смоделирована с использованием набора инструментов MATLAB – «Neural Network» [4].

Используя этот метод будет наблюдаться эффект, что сустав не следует траектории, а имеет погрешность. Эти ошибки можно свести к минимуму, увеличив количество итераций при обучении сети.

Заключение

В этом исследовании упрощенной модели роботизированной лягушки были рассмотрены прямая и обратная кинематика кинематика. Для решения обратной задачи кинематики используются два метода: метод Якобиана и метод ИНС. Поскольку кинематическая модель ноги содержит много степеней свободы метод Якоби в некоторых случаях не дает допустимого решения. С другой стороны, метод ИНС в некоторых случаях дает допустимое решение с высокой погрешностью. Точность решения ИНС можно повысить, правильно обучив сеть с большим количеством обучающих наборов данных. Стоит отметить, что обучение ИНС является трудоемким процессом, однако как только сеть будет обучена, ее можно использовать для получения решения инверсной кинематики за очень короткое время [5].

В дальнейшей работе будет выбрано периферийное оборудование, исполнительные органы, датчики обратной связи и системы определения данных среды. После определения геометрических показателей оборудования будет окончательно спроектирована система передвижения и рассчитаны эпюры напряжений.

Список источников

1. *Dasari A., Reddy N.* Forward and inverse kinematics of a robotic frog // 2012 4th International Conference on Intelligent Human Computer Interaction (IHCI), Kharagpur. India, 2012. P. 1–5.

2. *Hasan A., Hamouda A.* An Adaptive Learning Algorithm to Solve the Inverse Kinematics problem of a 6 D.O.F. Serial Robot Manipulator», Advances in Engineering Software. Vol. 37. P. 432–438.

3. Проблемы применения систем автоматики в управлении электромеханическими устройствами / Е. С. Квас, В. П. Кузьменко, А. В. Рысин и др. // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: сб. статей XXII Междунар. науч. конф.: в 2 ч. Ч. 2. СПб.: ГУАП, 2019. С. 250–253.

4. *Armour R., Paskins K., Bowyer A.* Jumping Robots: a biomimetic solution to locomotion across rough terrain // Bioinspiration & Biomimetics. 2007. Vol. 2. P.65–82.

5. Neuro-fuzzy control system of power unit in hybrid vehicle / S. Solenyi, S. Serikov, V. Kuzmenko at al. // Metrological support of innovative technologies, 2021. P. 170–172.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.316.9 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-283-287**

М. Ю. Ветлицын*
ассистент, аспирант
Ю. А. Ветлицын**
начальник ЭТЛнк
**Волгоградский государственный технический университет*
***МУП «Метроэлектротранс», г. Волгоград*

ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАЩИТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Рассмотрены подходы к построению защит асинхронных электродвигателей. Показана практическая востребованность построения защит на базе микропроцессорных устройств, что позволяет значительно расширить количество отслеживаемых и отключаемых ненормальных режимов работы электрооборудования.
Ключевые слова: *релейная защита и автоматика (РЗА), фильтр симметричных составляющих (ФСС), совершенствование РЗА, защита электродвигателя, микропроцессорные устройства.*

M. Y. Vetlitsyn*
Assistant, PhD Student
Y. A. Vetlitsyn**
Head of ETLnk
**Volgograd State Technical University*
***MUP «Metroelectrotrans», Volgograd*

PROBLEMS OF IMPLEMENTATION OF PROTECTION OF ELECTRIC MOTORS IN THE CONDITIONS OF MODERN TECHNOLOGICAL PROCESS

Approaches to the construction of protection of asynchronous electric motors are considered. The practical relevance of building protections based on microprocessor devices is shown, which makes it possible to significantly expand the number of monitored and disabled abnormal modes of operation of electrical equipment.
Keywords: *relay protection and automation (RPA), symmetrical components filter (FSS), improvement of RPA, motor protection, microprocessor devices.*

Для продления срока службы электродвигателей необходим контроль их состояния в процессе выполнения технологических задач. В практической эксплуатации задача контроля состояния электродвигателя решается посредством применения определенного набора защит и устройств мониторинга состояния. Определение необходимых объемов модернизации защит электродвигателей технологического оборудования, особенно в разветвленных сетях производственных предприятий, с минимизацией противоречий срабатывания по селективности и выбору уставок между РЗА разных конструкционных и технических исполнений является сложной практической задачей. Во многих случаях используется персональные устройства РЗА электродвигателей.

В современном технологическом процессе асинхронные двигатели (АД) являются наиболее распространенными, что определяется их эксплуатационными и ценовыми преимуществами. Оборудование, соответствующее требованиям современного технологического процесса, имеет меньшее количество механических передач между валом двигателя и рабочим органом, вследствие чего электродвигатель работает в динамических режимах с практически непрерывным регулированием частоты вращения. Для электроприводов высокоточных механизмов и машин стремятся конструктивно объединить рабочий орган с приводными электродвигателями, конструктивно интегрируя электропривод в состав шпинделя, мотор-редуктора или мотор-колеса [1].

Актуальной задачей является применение АД и систем управления приводами в мобильных роботах «тяжелой» весовой категории, ис-

пользуемых в экстремальных условиях движения по неорганизованной поверхности. В мобильном автономном подводном роботе «МАК-1» [2]–[4], в качестве привода шагающих движителей применяются асинхронные двигатели. Вследствие существенно разной нагрузки на двигателях робота, любая перегрузка и остановка ведет к потере контроля над машиной. Для решения проблемы необходим контроль состояния различных параметров двигателя, обеспечивающий гарантированное управление машиной.

Несмотря на значительное совершенствование электронных устройств для коммутации, регулирования и управления асинхронными электродвигателями, в большинстве случаев потребители используют защиты, установленные на выключателях электродвигателя. Поэтому вопросы, связанные с разработкой и применением устройств РЗА и совершенствованием методов выбора установок, будут актуальными многие годы [5].

Эксплуатация асинхронных электродвигателей связана с возможностями возникновения различных аварийных ситуаций, технических неисправностей и ненормальных режимов работы [6], [7]:

– междуфазные короткие замыкания;
– однофазные короткие замыкания;
– витковые замыкания в обмотке;
– сверхтоки при обрыве фазы;
– сверхтоки технологической перегрузки;
– сверхтоки при понижении напряжения;
– повышение напряжения.

Для обеспечения нормальной эксплуатации питающей сети 6–10 кВ, электродвигателя и технологического оборудования до 90-х годов XX века в схеме (рис. 1) предусматривались:

– быстродействующая защита от междуфазных коротких замыканий в обмотках электродвигателя и соединениях с коммутационным аппаратом;

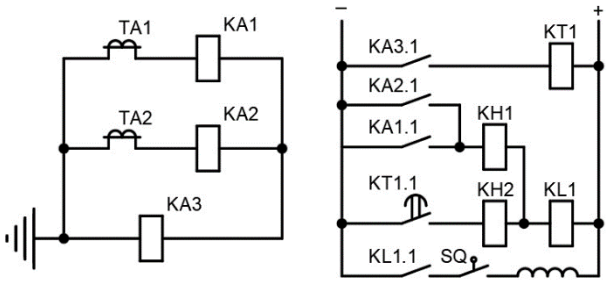


Рис. 1. Схема релейных защит асинхронного электродвигателя

– специальная защита от замыканий на землю, действующая на отключение;

– защита от сверхтоков перегрузки, действующая на отключение с выдержкой времени.

Концепция защиты электродвигателя от перегрузок базировалась на тепловой модели равномерного нагрева симметричными токами нормального режима. Выдержка времени для перегрузок по току статора свыше $k=I/I_{ном} \geq 1{,}4$ определялась по выражению

$$t_n = \frac{A}{k^2 - 1}.$$

Коэффициент A=150÷250 с и определялся по типу и исполнению электродвигателя с учетом условий эксплуатации [6]. Развитие электромашиностроения происходило на росте интенсивности использования электротехнических, проводниковых и изоляционных материалов, следствием этого стало снижение запаса устойчивости электродвигателей к тепловым перегрузкам, перенапряжениям и протеканию токов замыкания на землю. Совершенствование систем защиты электродвигателей выполнялось путем разработки принципиально новых устройств на полупроводниковой и микроэлектронной базе, что позволило более точно и глубоко производить обработку информации о режиме работы, применять более точные математические модели, описывающие воздействия наблюдаемых параметров на питающую сеть, двигатель и технологическое оборудование [8].

Например, выполнение защиты от перегрузки производилось непрерывным отслеживанием вторичных мгновенных значений тока i_1, с последующей обработкой сигнала в относительных единицах $i_{*1=}i_1/i_{норм}$. Функциональная схема полупроводниковой защиты от перегрузки (рис. 2) содержит следующие элементарные устройства [5]:

– i/u преобразователи ток/напряжение;
– ФСС фильтр симметричной составляющей;
– ФМ формирователь модуля;
– ФНЧ фильтр низкой частоты;
– ФП функциональный преобразователь;
– И-интегратор;
– К1- и К2-компараторы.

В функциональной схеме (рис. 2) допустимое время перегрузки оценивается с помощью критерия термической стойкости [5]

$$A = I_{.1}^2 \cdot t_{доп} = \text{const}$$

с расчетом относительного среднеквадратичного значения тока I_{*1} по формуле

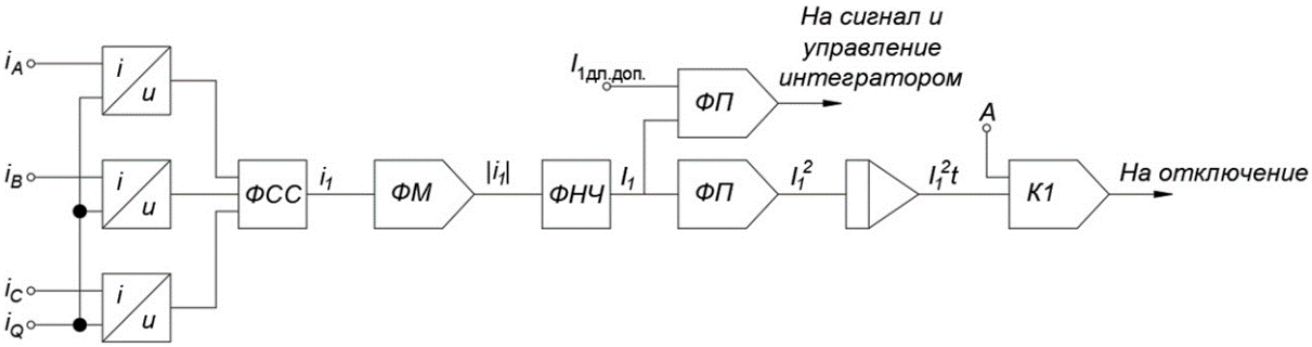


Рис. 2. Функциональная схема полупроводниковой защиты от перегрузки

$$I_{.1} = \sqrt{\frac{1}{t}\int_0^t i_{.1}^2 dt},$$

при этом для асинхронных электродвигателей критерий A=60÷120 с.

Такая концепция использования тепловой защиты, как альтернатива защиты от перегрузки, в микропроцессорных терминалах применяется в виде математической модели расчета перегрева электродвигателя ($E_{нагр\,\%}$) [9]

$$E_{нагр\%} = 100 \cdot \left(\frac{I_1}{I_{ном}}\right)^2 \left(1 - e^{-\frac{t_{нагр}}{T_{e1}}}\right) + E_{0\%} e^{-\frac{t_{нагр}}{T_{e1}}},$$

где $I_{ном}$ – уставка эквивалентного номинального тока, А; T_{e1} – постоянная времени нагрева двигателя, с; $t_{нагр}$ – рассматриваемый момент времени, с; $E_{0\,\%}$ – перегрев двигателя в начале процесса нагрева, %.

Применение стандартной расстановки устройств защиты на основном выключателе электродвигателя часто сталкивается с необходимостью учета влияния на работу РЗА дополнительных агрегатов – преобразователей частоты или устройств плавного пуска. Предположим, защита должна выполнить сравнение некоторой векторной величины по измерениям тока и напряжения [6]

$$\vec{A} = \vec{U}_p \cdot e^{ia} + k \cdot \vec{I}_p$$

с абсолютным значением базовой величины нормального режима

$$\vec{A}_n = \vec{U}_p \cdot e^{ia} + k \cdot \vec{I}_p.$$

Выполнение сравнения в цифровом устройстве РЗА связано с выделением симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности каждой измеряемой величины X(U, I) по соотношениям, описывающим стационарные процессы в электрических цепях [5]

$$\begin{cases} 3.\ \vec{X}_{1A} = \vec{X}_A + \vec{X}_B \cdot e^{i120} + \vec{X}_C \cdot e^{i240} \\ 3.\ \vec{X}_{2A} = \vec{X}_A + \vec{X}_B \cdot e^{i240} + \vec{X}_C \cdot e^{i120} \\ 3.\ \vec{X}_0 = \vec{X}_A + \vec{X}_B + \vec{X}_C \end{cases}.$$

Стандартная реализация ФСС в устройствах РЗА описывается уравнением

$$\vec{A} = \vec{K}_1 \cdot \vec{X}_1 + \vec{K}_2 \cdot \vec{X}_2 + \vec{K}_0 \cdot \vec{X}_0,$$

где K_1, K_2, K_0 – коэффициенты фильтра.

Практическая реализация ФСС передаточной функцией, содержащей звенья второго порядка, имеет хорошую точность определения измеряемых величин для синусоидальных сигналов частотой 50Гц. В действительности процессы, контролируемые измеряемыми величинами, оказываются нестационарными. Применение в технологическом процессе ПЧ и УПП изменяет условия и по месту расположения измерительных датчиков, и по форме сигнала, вследствие чего, устройство РЗА в дополнение к ошибкам измерительных трансформаторов вносит и ошибки преобразования сигнала.

Выполнение устройством РЗА сравнения средних значений величины $X(U, I)$ на интервале усреднения T

$$X_C = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T x dt$$

с заданным значением уставки реализуется посредством разложения измеряемой величины в ряд Фурье [5]

$$|x(t)| = \frac{2 \cdot X_m}{\delta} \times$$

$$\times \left(1 + \frac{2}{3}\cos(2\omega t) - \frac{2}{15}\cos(4\omega t) + \frac{2}{35}\cos(6\omega t) - \ldots\right).$$

Получаемое значение величины содержит, как ошибки, внесенные измерительными датчиками, так и погрешность преобразования (определенную длинной ряда), что очевидно не удовлетворяет требованиям контроля двигателя в современном технологическом процессе.

В простых устройствах РЗА сравнение амплитуды параметра $X(U, I)$ реализуют, контролируя время между «первой» и «второй» точками измерения, считая известным период сигнала имеющего синусоидальную форму [5], [10]

$$x(t) = X_m \cdot \sin \omega t.$$

Измерение в двух точках снижает подверженность устройства РЗА действию случайных высокочастотных составляющих, но не обеспечивает достоверность измерения при наличии гармонических составляющих входного сигнала, обусловленных технологическим процессом работы электродвигателя.

Исследования и сравнительный анализ основных величин, характеризующих токи и напряжения различной формы, протекающие в обмотках электродвигателя, подтверждают влияние формы на выходной момент, нагрев и режим работы. В работах А. И. Шиянова показано, что для достижения одинакового момента при различных формах кривой напряжения ток в обмотках статора может увеличиваться в действующем или максимальном значении в 1,5 раза [11].

Необходимо отметить, что преобразователи частоты (ПЧ) и устройства плавного пуска могут ограничивать ток, проходящий через измерительные трансформаторы первичной схемы, не нарушая требования технологического процесса работы электродвигателя. Вследствие чего моделирование процесса нагрева по измерению тока отличается от реального процесса в элементах электродвигателя.

Указанные конструкционные особенности РЗА затрудняют обеспечение требований защиты электродвигателей, имеющих устройства регулирования режима работы, участвующих в сложных технологических процессах, что делает актуальным вопрос непосредственного контроля состояния электродвигателя.

При выполнении модернизации оборудования возможна установка устройств непосредственного контроля параметров (ток, температура, скорость, вибрация) элементов электродвигателя [12]. Установка устройства РЗА на выключателе останется необходимой для отслеживания параметров взаимодействия электрической сети и оборудования, что соответствует заложенных в них процедурам обработки сигналов. Вариант схемы непосредственного контроля параметров электродвигателя предусматривающий обмен информации с преобразователем частоты (рис. 3) предусматривает размещение датчиков в контрольных точках (подшипники, корпус, обмотки) и использование трансформаторов тока с широким частотным диапазоном на вводах электродвигателя. Сигналы с датчиков поступают на вход микроконтроллера, обрабатываются в соответствии с алгоритмом и сравниваются с допустимыми значениями параметров соответствующие классу электродвигателя. Наличие информации о частоте, периоде и напряжении поступающим от ПЧ обеспечивают возможность точного измерения и упрощает обработку сигнала. Схема содержит блок микропроцессорной защиты двигателя, устанавливаемый на выключателе и устройство контроля параметра и защиты (УКПДЗ).

Применение микропроцессорных устройств РЗА позволяет значительно расширить количество отслеживаемых и отключаемых ненормальных режимов работы электрооборудования. При этом расширение возможностей РЗА на микропроцессорных устройствах значительно опережает накопление статистического опыта по результатам эксплуатации.

Практическое применение предполагаемого регулирования актуально для управления асинхронными двигателями механизмов движения подводного шагающего робота [2].

Основная доля устройств РЗА предназначена для работы в условиях обеспечения требуемого режима электрической сети, что затрудняет выполнение функции защиты электродвигателя в условиях современного технологического процесса. Научные работы, направленные на расширение возможностей защиты электродвигателей также в основном, базируются на исследование стационарных режимов [13].

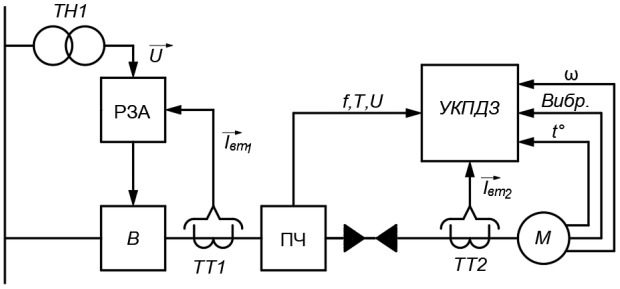


Рис. 3. Схема подключения устройства защиты и непосредственного контроля параметров электродвигателя

Оценка точности наблюдения устройств РЗА за параметрами оборудования при применении цифровой обработки измерительной информации показывает востребованность разных способов расчета и моделирования параметров в условиях не стационарности наблюдаемых процессов.

Сравнение способов построения различных устройств защиты электродвигателей и способов моделирования ими ненормальных режимов работы показывает необходимость установки специализированных устройств контроля параметров электродвигателя. Авторами предложен вариант устройства непосредственного контроля температуры элементов электродвигателя, который позволит оценить неравномерность нагрева в условиях динамических режимах с несинусоидальными токами в обмотках электродвигателя.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00720, https://rscf.ru/project/23-29-00720/.

Список источников

1. *Епифанов А. П., Малайчук Л. М., Гущинский А. Г.* Электропривод: учебник / Под ред. А. П. Епифанова. СПб.: Лань, 2012. 400 с.

2. *Чернышев В. В., Арыканцев В. В.* Мак-1 – подводный шагающий робот // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. № 2 (7). С. 45–50.

3. Design and underwater tests of subsea walking hexapod MAK-1 / V. Chernyshev, V. Arykantsev, A. Gavrilov et al // Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2016. Vol. 7. P. 54440.

4. *Чернышев В. В., Арыканцев В. В.* Исследование процесса самосинхронизации движений ног в шагающем аппарате с независимыми электроприводами бортов // Робототехника и искусственный интеллект: материалы XII Всерос. научно-техн. конф. с международным участием. Железногорск, 28 ноября 2020 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Сибирский федеральный университет; Межинститутская базовая кафедра «Прикладная физика и космические технологии». Железногорск: Литера-Принт, 2020. С. 33–38.

5. *Ванин В. К., Павлов Г. М.* Релейная защита на элементах вычислительной техники. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 336 с.

6. *Андреев В. А.* Релейная защита, автоматика и телемеханика в системах электроснабжения. М.: Высшая школа, 1985. 391с.

7. *Шабад М. А.* Максимальная токовая защита. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 96 с.

8. *Жраков С. В.* Развитие релейной защиты в электроэнергетической системе России // StudNet. 2021. Т. 4. № 4.

9. СТО ДИВГ-046-2017. Терминалы релейной защиты синхронных и асинхронных электродвигателей 6–10 кВ. НТЦ «Механотроника», 2017.

10. *Середа А. Г.* Расширение функциональных возможностей аппаратов релейной защиты на основе анализа действующего значения тока // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2013. № 3 (23). С. 75–82.

11. *Шиянов А. И.* Электропривод переменного тока с несинусоидальными фазовыми токами // Автоматизированный электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 22–30.

12. *Ногин И. А., Волощенко Ю. П.* Блок защиты асинхронного электродвигателя в сетях 0,4кВ от ненормальных режимов работы // Проблемы современной системотехники: сб. научных статей / Ответственный редактор В. Т. Корниенко; Министерство образования и науки Российской Федерации; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»; Институт радиотехнических систем и управления. Таганрог: Издатель Ступин С. А., 2021. С. 29–35.

13. *Булычев А. В., Поздеев Н. Д., Черепанов И. В.* Анализ характеристик защит электродвигателей от симметричных перегрузок // Перспективные технологии автоматизации: тезисы докл. междунар. электронной научно-техни. конф. Вологда: ВоГТУ. 1999. С. 87–88.

УДК 681.51 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-288-293**

А. В. Выграновская*
магистрант
Е. И. Карпов*
магистрант
Д. А. Павлюков*
магистрант
Д. Д. Буйчик*
магистрант
С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ

Рассмотрены и приведены данные сравнительного анализа автоматической системы контроля скорости привода постоянного тока с использованием ПИД-регулятора, регулятора нечеткой логики и нейро-нечеткий регулятор. В качестве привода постоянного тока выступает JGA25-370. Для исследования использовался пакет программы MatLab и Simulink, а также математическая модель двигателя постоянного тока.
Ключевые слова: *ПИД-регулятор, регулятор нечеткой логики, нейро-нечеткий регулятор.*

A. V. Vygranovskaya*
Postgraduate Student
E. I. Karpov*
Postgraduate Student
D. A. Pavlyukov*
Postgraduate Student
D. D. Buychik*
Postgraduate Student
S. V. Solyonyj*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

COMPARATIVE ANALYSIS OF REGULATORS FOR ELECTRIC DRIVES

The measurement data of a high-speed DC drive system using a PID controller, a fuzzy logic controller, and a neuro-fuzzy controller control are included and revealed in the articlem. As DC drive JGA25-370. For the study, the MatLab and Simulink software packages were used, as well as a mathematical model of a DC motor.
Keywords: *PID controller, fuzzy logic controller, neuro-fuzzy controller.*

Введение

В современном мире широко применяются двигатель постоянного тока, данный вид двигателя пользуется спросом из-за простоты, точности и непрерывности регулировочных характеристиках. Очень часто для регулировки привода малой мощности можно встретить системы, использующие метод контроля тока. Желаемые характеристики крутящего момента могут обеспечиваться контроллерами пропорционально-интегрального (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) типов. Помимо ПИД-регулятора, существует нечеткий регулятор и нейро-нечеткой логики (АСНЛ). Данные регуляторы просты в управлении и имеют достаточно высокую производительностью [1].

Цель данной работы – сравнение регуляторов для двигателя постоянного тока JGA25-370. В работе будет использоваться математическая модель двигателя, будут построены модели ПИД, нечеткого и нейро-нечеткого регуляторов. Все модели представлены в среде разработки MATLAB-Simulink.

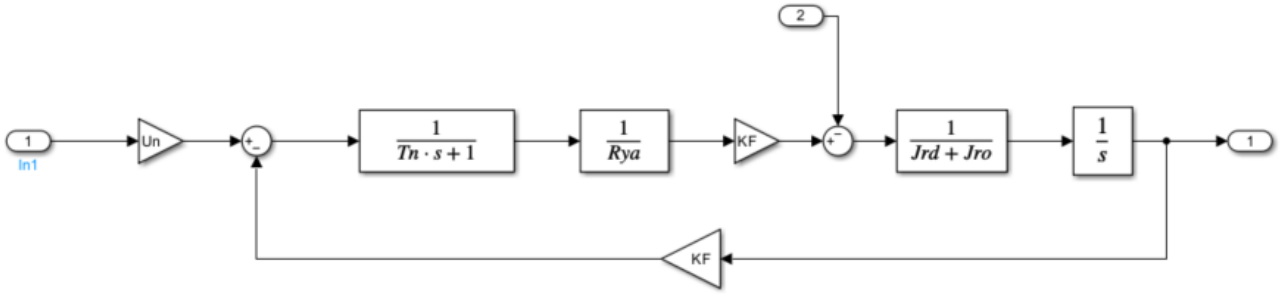


Рис. 1. Математическая модель электропривода

Математическое описание объекта управления

В качестве объекта регулирования будет использоваться двигатель постоянного тока JGA25-370. Общая математическая модель данного двигателя представлена системой уравнений (1)

$$\begin{cases} u_{\text{я}} = i_{\text{я}} \times R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \times \dfrac{di_{\text{я}}}{dt} + e; \\ u_{\text{в}} = i_{\text{в}} \times R_{\text{в}} + L_{\text{в}} \times \dfrac{di_{\text{в}}}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

где $u_{\text{в}}$, $u_{\text{я}}$, $i_{\text{я}}$, $i_{\text{в}}$ – мгновенное значения напряжений и токов возбуждения и якоря; $R_{\text{в}}$, $R_{\text{я}}$, $L_{\text{в}}$, $L_{\text{я}}$ – активное сопротивление и индуктивность обмоток возбуждения и якоря; $e = K \times \Phi \times \omega$ – ЭДС вращения якорной обмотки; ω – мгновенное значение скорости вращения якоря; Ф – мгновенное значение потока возбуждения; $K = \dfrac{p \times N}{2 \times a}$ – конструкторский коэффициент; p – число пар полюсов; N – число активных проводников якорной обмотки; a – число параллельных ветвей якорной обмотки.

На основе системы уравнений (1) в пакете программы MATLAB\Simulink построим математическую модель двигателя постоянного тока с управлением скорости вращения за счет изменения напряжения. Математическая модель представлена на рис. 1.

Основные параметры двигателя JGA25-370:

– $U_{\text{н}} = 12\,(\text{В})$ – номинальное значение напряжения обмотки якоря;

– $I_{\text{н}} = 0{,}1\,(\text{А})$ – номинальное значение тока обмотки якоря;

– $M_{\text{н}} = 0{,}0078\,(\text{Нм})$ – номинальное значение момента вращения;

– $J_{\text{рд}} = 1{,}88 \times 10^{-3} (\text{кг} \times \text{м}^2)$ – момент инерции ротора двигателя;

– $R_{\text{я}} = 0{,}68\,(\text{Ом})$ – сопротивление обмотки якоря.

Основной расчет выполним в программе MatLab. После запуска программы в командном окне были получаем следующие значения:

– скорость XX=75 рад/с;

– скорость XX=716,1972 об/мин;

– пусковой ток = 3,4884 А;

– пусковой момент = 0,27907 Нм;

– жесткость механической характеристики = 0,0037209.

Помимо данных, были получены характеристики переходного процесса, которые представлены на рис. 2 в виде графиков.

На рис. 2 можно увидеть, что двигатель набирает номинальную скорость вращения на 40 секунде. Для всех регуляторов будет подавать-

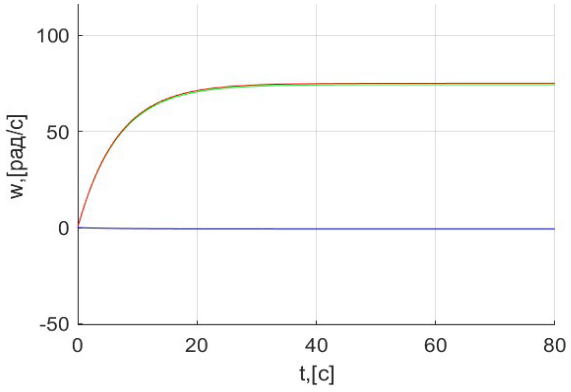


Рис. 2. Графики переходного процесса для двигателя JGA25-370

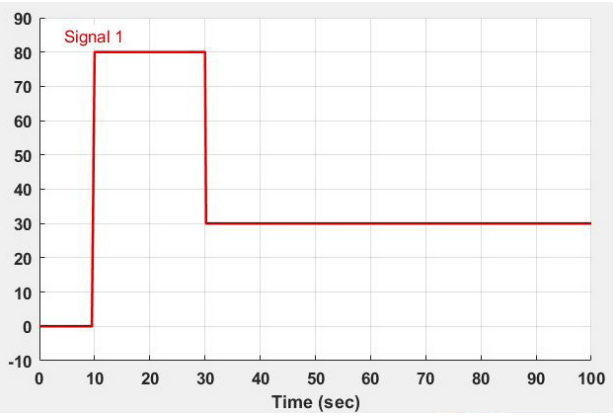


Рис. 3. Подаваемый сигнал на регулятор

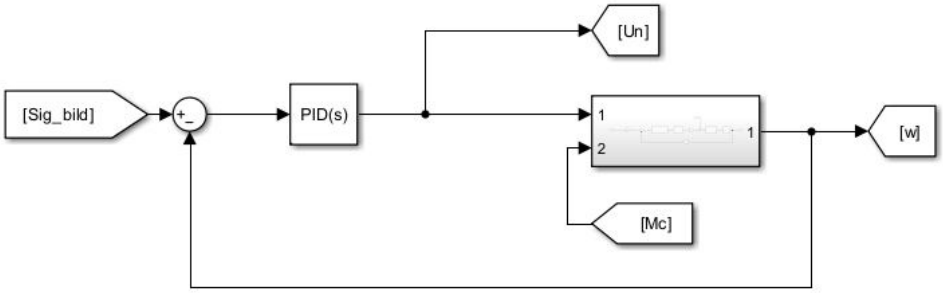


Рис. 4. Схема ПИД-регулятора

ся одинаковый сигнал значения скорости, данный двигатель используется для перемещения робоплатфтрмы, поэтому входной сигнал скорости вращения представим в виде ступенчатого сигнала, изображенного на рис. 3.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор

В качестве ПИД-регулятора воспользуемся блоком PIDController. Математическая модель в Simulink показана на рис. 4. БлокPID(s) идентичен блоку DiscretePIDController с набором параметров Timedomain к Continuous-time (непрерывный решатель).

На рис. 5 показана получаемая характеристика. На графике видно, что ПИД отрабатывает свою функцию с временем переходного процесса за 14 секунд и перерегулированием в 13 %, что близко к требуемым значениям, но все еще не попадает в максимум 10 %, который принято считать стандартом.

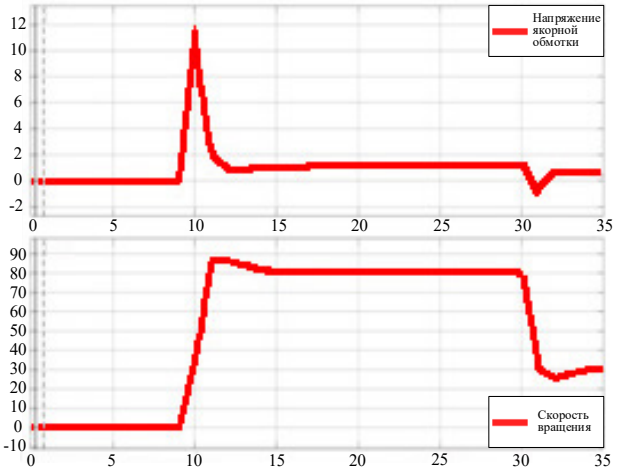


Рис. 5. ПИД-регулятор

Нечеткая система управления

Нечеткий регулятор представляет из себя метод управления, основывающийся на базе приобретенных знаний (опыте эксперта) о способах функционирования объекта. Здесь взаимодействия входных и выходных воздействий можно описать с помощью лингвистических терм с набором нечетких инструкций (правил) (IF – THEN). На рис. 6 представлена структурная схема системы управления с НР.

Внутренняя типовая структура НР состоит из четырех основных блоков: входного преобразователя, реализующего процесс перехода от точных значений к их нечеткой интерпретации (блок «фаззификации»). База правил нечеткой логики, содержащая экспериментальные данные о процессе управления; блок нечеткого логического вывода, являющийся ядром нечетких вычислений и моделирующий процедуру принятия решения человеком, и преобразователь вывода нечетких множеств в единое четкое выходное значение u_y, используемое в данный момент для управления частотой вращения двигателя («деффазификация»).

Для проектирования системы с использованием нечеткой логики мы используем пакет расширения для MatLab, FuzzyLogicToolbox.

На рис. 7 представлен внешний вид регулятора в Simulink.

В табл. 1 приведены правила, используемые для регуляции нечеткой системы управления.

Для выявления особенностей различных структур НР всех лингвистических переменных используются одни и те же треугольные функции принадлежности (рис. 8) с термами.

BN – «большое отрицательное», N – «отрицательное», Z – «нулевое», P – «положительное», BP – «большое положительное». Рис. 9 демонстрирует отклик системы с нечетким регулятором.

На графике можно заметить, что система приходит к устойчивому состоянию почти так, как требуется согласно техническому заданию, но из-за систематической погрешности на выходе развивается скорость меньше необходимой на 3 %.

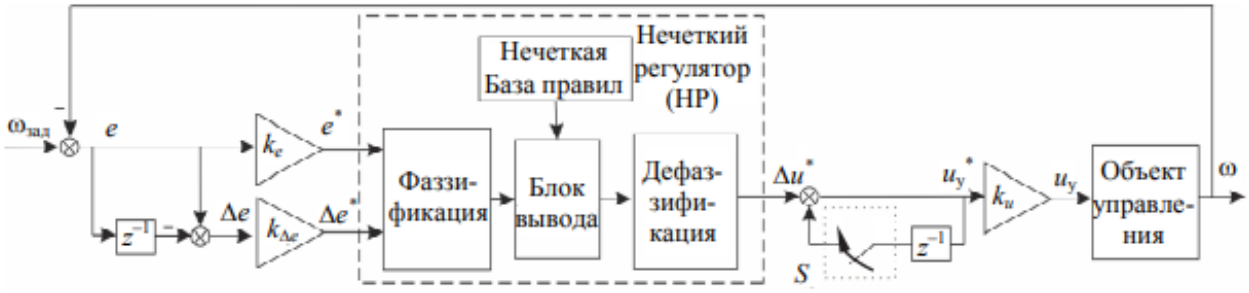


Рис. 6. Модель ДПТ с нечеткой системой управления

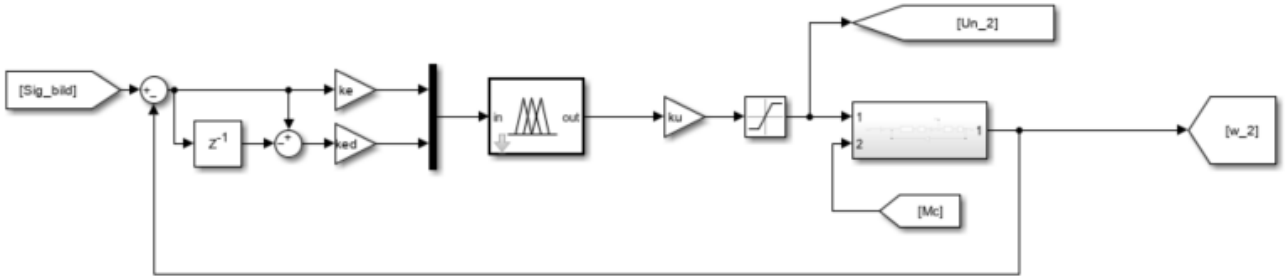


Рис. 7. Модель ДПТ с нечеткой системой управления

Таблица 1

База правил с двумя входными сигналами

	BN	N	Z	P	BP
BN	BN	BN	N	N	Z
N	BN	BN	N	N	P
Z	N	N	Z	P	P
P	N	Z	P	P	BP
BP	Z	P	P	BP	BP

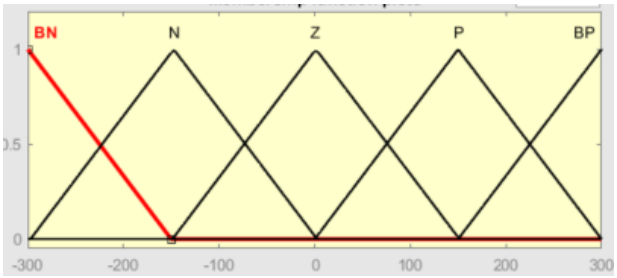


Рис. 8. Функция принадлежности нечеткого регулятора

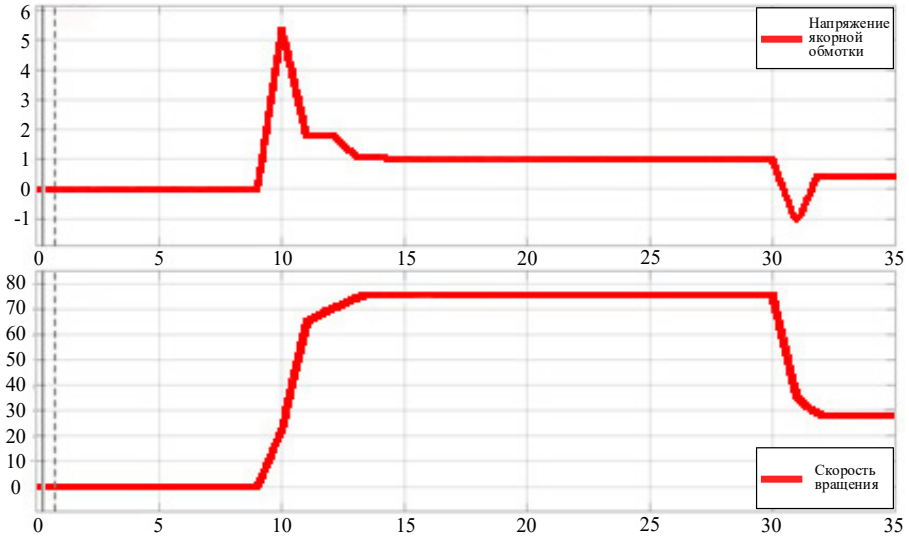


Рис. 9. Характеристики с нечеткой системой управления

Адаптивная система нейро-нечеткого вывода

На сегодняшний день известно несколько способов управления нелинейными системами при помощи нейро-нечеткого моделирования. Нейро-нечеткая модель включает в себя базу знаний и представления нечеткой логики и способность обучаться, характерной нейронной сети. Система нейро-нечеткого вывода (АНСЛ) наследует преимущества вышеуказанных подходов. Существует несколько способов интеграции искусственных нейронных сетей ИНС и систем нечеткого вывода НВ, и часто выбор зависит от приложений. Контроллер АСНЛ генерирует изменение опорного напряжения на основе ошибки скорости (e) и ее производной (de), которые определяются как

$$e = \omega_{ref} - \omega; \quad (2)$$

$$de = \left[d\left(\omega_{ref} - \omega\right)\right] \Big/ dt, \quad (3)$$

где ω_{ref} и ω – опорная (желаемая) и фактическая скорости соответственно. Полная имитационная модель привода двигателя представлена на рис. 10. На рис. 11 представлена типичная архитектура АСНЛ-контроллера. Она содержит два входа и один выход в соответствии с системой нечеткого вывода Сугено.

После обучения модели по данным полученных на модели нечеткого регулятора получаем характеристику, представленную на рис. 12.

На рис. 12 нейрон отлично отрабатывает полученное задание с ошибкой <1 %, система не имеет перерегулирования и обладает хорошим показателем времени переходного процесса.

Сравнение результатов и выводы

Выбор регулятора привода постоянного тока напрямую влияет на эффективность работы привода, определяет его устойчивость при внешнем воздействии и обеспечивает точность функционирования. При анализе различного вида регуляторов мы получили несколько характеристик, представленных на рис. 13.

Сравнивая все полученные графики, можно сделать вывод, что нейро-нечеткий регулятор является лучшим вариантом для регулирования характеристик ДПТ с текущими параметрами. ПИД-регулятор, исходя из полученных данных, показал наибольшее значение ошибки и перерегулирования, а НСУ, несмотря на удовлетворительное время переходного процесса, имеет значительную погрешность устоявшегося значения.

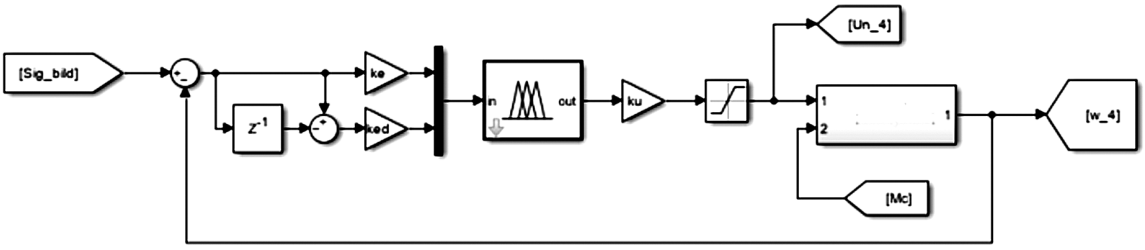


Рис. 10. Модель управления ДПТ с использованием АСНЛ-контроллера

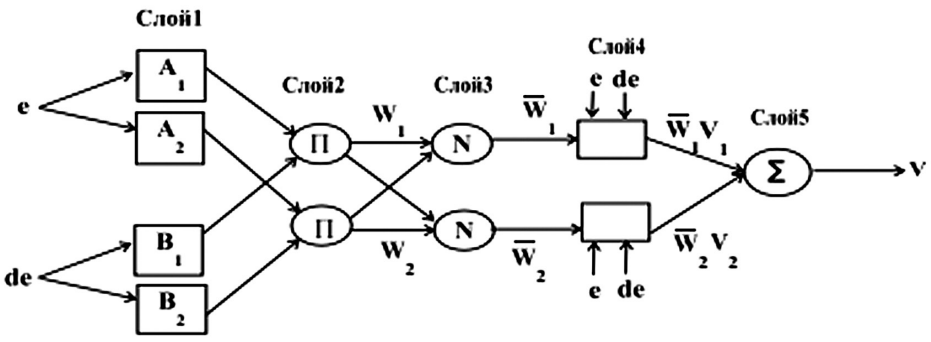


Рис. 11. Архитектура АСНЛ в соответствии с системой нечеткого вывода Такаги – Сугено

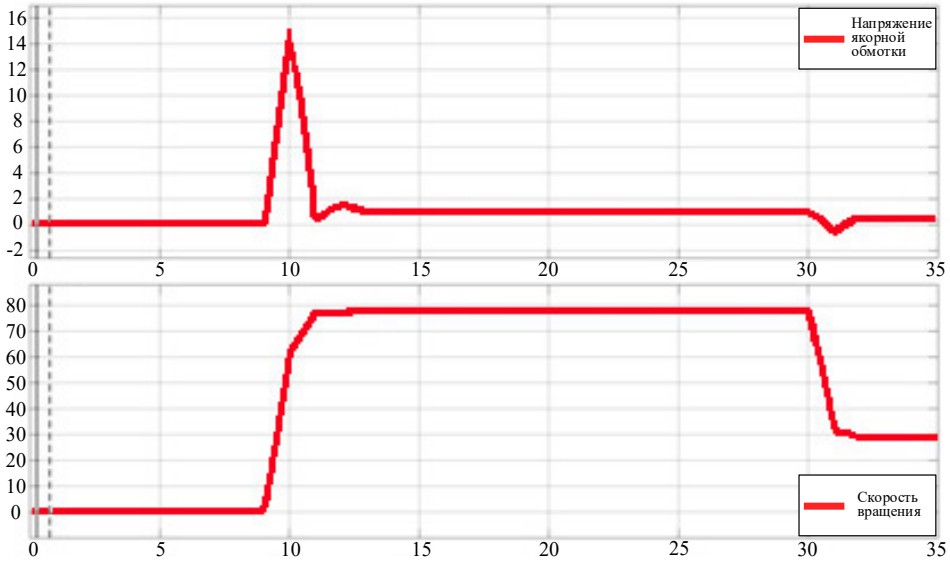


Рис. 12. Характеристики с нейро-нечеткой системой управления

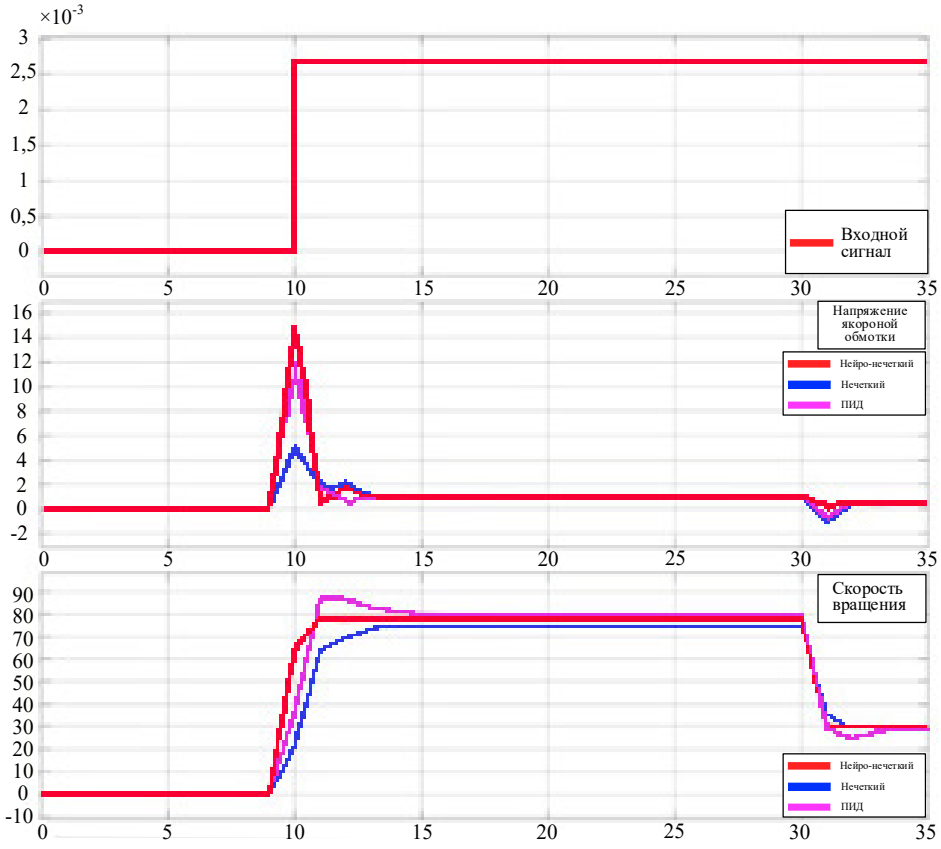


Рис. 13. Характеристики ДПТ с различными регуляторами

Список источников

1. *Зуб А. Т.* Управление организационными кризисами. М.: Юрайт, 2003. 237 с.

2. *Маринко Г. И.* Управление знаниями // Экономика и предпринимательство. 2015. № 3. С. 15–17.

3. *Петров А. В.* Экономика и право. URL: https: // www.ronl.ru/stati/gosudarstvo-ipravo/722842 (дата обращения: 15.06.2018).

УДК 567.43 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-294-298**

В. А. Голубков*
кандидат технических наук, доцент
Е. Ю. Ватаева*
старший преподаватель
А. Г. Федоренко*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ, НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ И СОСТОЯНИЕ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Рассматривается проблематика, связанная с техническим состоянием несущих поверхностей смазочного слоя, а также узлов трения. Рассматриваются такие влияющие факторы, как повышение температуры, текстурированние структуры металла. Приводятся графические результаты работы.
Ключевые слова: *узлы трения, трибология, ресурс подшипника, шарикоподшипник.*

V. A. Golubkov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
E. Y. Vataeva*
Senior Lecturer
A. G. Fedorenko*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCING THE TECHNICAL CONDITION, THE BEARING CAPACITY OF THE LUBRICATING LAYER AND THE CONDITION OF THE WORKING SURFACES OF FRICTION UNITS

The article deals with the problems associated with the technical condition of the bearing surfaces of the lubricating layer, as well as friction units. Such influencing factors as temperature increase, metal structure texturing are considered. Graphical results of the work are given.
Keywords: *friction units, tribology, bearing life, ball bearing.*

Основными факторами, оказывающими влияние на технической состояние (ТС), несущую способность смазочного слоя и состояние рабочих поверхностей узлов трения (УТ), являются:

– неоднородность физико-механических свойств приповерхностных слоев рабочих поверхностей УТ;

– технологические погрешности изготовления и сборки УТ;

– конструктивные параметры УТ;

– относительная скорость смещений рабочих поверхностей УТ;

– наличие и количество продуктов износа в смазке;

– температура УТ;

– трение в УТ;

– вибрационная нагрузка на УТ;

– изменение формы и (или) размеров контактирующих тел в процессе их изнашивания;

– процессы физического старения деталей трибологической системы.

В результате технологической обработки деталей УТ изменяются свойства их материалов. В первую очередь изменяются свойства приповерхностных слоев рабочих элементов УТ. Не менее глубокие изменения происходит в этих слоях в процессе их фрикционного нагружения.

В металлах в слое порядка 10–100 нм протекают интенсивные процессы пластического течения, ведущие к текстурированию структуры, происходят процессы фрагментации и гомогенизации приповерхностных слоев. Высокие температуры, развивающиеся при трении, спо-

собствуют протеканию диффузионных процессов, в результате чего происходит легирование поверхности, коагуляция отдельных структурных составляющих, образуются закалочные структуры. Взаимодействие металлических элементов УТ со смазочным материалом приводит к адсорбции и хемосорбции активных веществ, ведущим к повышению пластичности и снижению прочности рабочих элементов УТ (эффект Ребиндера).

Смазочный материал оказывает сильное влияние не только на пластические, но и на упругие характеристики материалов. Установлено, например, что модуль упругости графита на поверхности которого имеется тонкий слой смазочного материала, почти в два раза меньше, чем без него [1], [2].

Изменение физико-механических свойств приповерхностных слоев элементов УТ влияет на контактные и фрикционные характеристики сопряжений.

На ТС и ресурс УТ оказывают влияние технологические погрешности их изготовления и сборки. Для шарикоподшипников существенное влияние оказывают: отклонение от формы дорожек качения колец, перекосы и несоосность колец, радиальный зазор в подшипнике, а также тип и количество смазки, вводимой в подшипник.

На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости влияния отклонения формы дорожек качения колец на ресурс работы шарикоподшипника [2].

Как видно из приведенных данных, ресурс подшипника в большей степени уменьшается от воздействий погрешностей формы внутреннего кольца (штриховые кривые), чем наружного (сплошные кривые), причем это влияние возрастает с увеличением номера K гармоники преобладающей погрешности. Последнее объясняется тем, что вращающееся кольцо шарикоподшипника создает более высокочастотные вибрации и большие нагрузки на шарики в отличие от низкочастотных вибраций и нагрузок не вращающегося кольца. Зависимость ресурса шарикоподшипников от некруглости дорожек качения колец носит экспоненциальный характер.

В процессе износа элементов шарикоподшипников происходит нарастание амплитуд погрешностей формы (рис. 2) [3]. Амплитуды некруглости дорожек качения внутренних колец (сплошные кривые) после выработки ресурса увеличиваются в 1,8–2,2 раза, а наружных колец (штриховые кривые) в 1,4–1,8 раза.

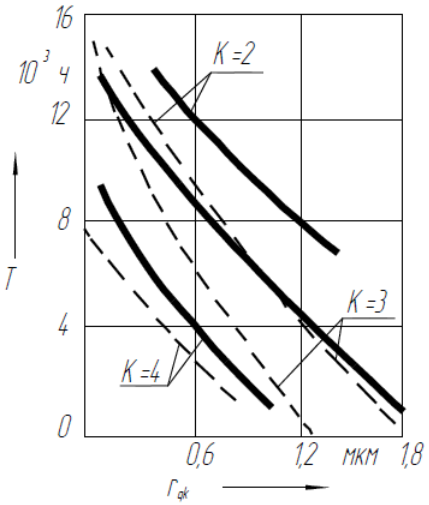


Рис. 1. Зависимость ресурса подшипника 6-60025 ЮТ со смазкой ВНИИНП-283 при n=15 000 об/мин от формы некруглости дорожек качения колец

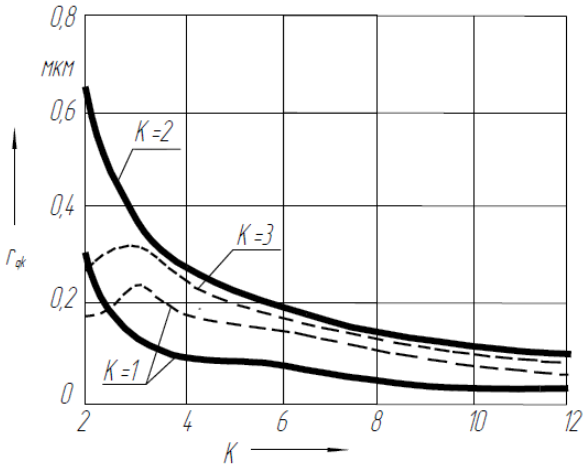


Рис. 2. Характеристики некруглости дорожек качения колец: 1 – некруглости до ресурсных испытаний; 2 – некруглости после ресурсных испытаний

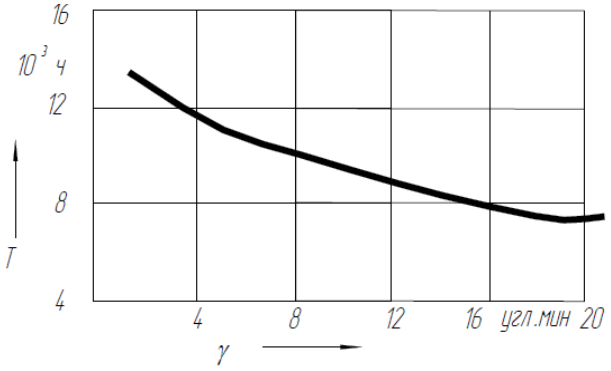


Рис. 3. Изменение ресурса подшипника 6-60025 ЮТ со смазкой ВНИИНП-274 в зависимости от перекоса

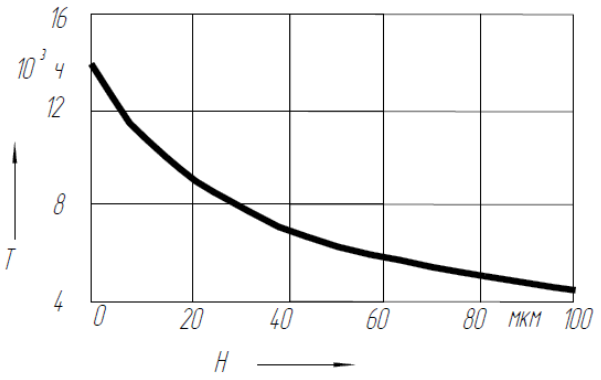


Рис. 4. Изменение ресурса подшипника 6-60025 ЮТ со смазкой ВНИИНП-274 от несоосности сборки кольцо – корпус

На рис. 3 и 4 приведены экспериментальные зависимости ресурса работы подшипников от перекосов и несоосности посадочных мест. Анализ экспериментальных данных показывает, что влияние несоосности подшипников на ресурс работы является наиболее существенным.

На ТС и ресурс работы подшипника значительное влияние оказывает также рабочий радиальный зазор, величину которого у приборных подшипников основного ряда назначают в пределах от 2 до 22 мкм. При больших значениях начального радиального зазора ресурс уменьшается за счет неравномерного распределения нагрузки по шарикам.

Из конструктивных параметров на долговечность шарикоподшипников в большей степени влияют диаметр шарика, число шариков и отношения радиусов желобов в диаметре шарика. Установлено [3], что при увеличении диаметра шарика в 1,5 раза расчетная долговечность возрастает 3 раза, при увеличении числа шариков на 14 % долговечность возрастает на 40 %.

ТС и долговечность подшипников также существенно зависят от материала и технологического процесса. Так, высокоскоростные прецизионные подшипники из сталей ШХ15 и IIXI8M, подвергнутых отпуску при повышение температуре, имеют более высокую долговечность и меньший износ по сравнению с подшипниками из стали ШХ15ВД.

При относительном скольжении контактирующих тел возникает сила трения. В исследование [4], в котором либо путем непосредственного наблюдения за развитием микротрещин, либо по косвенным признакам установлен усталостный характер разрешения поверхностей рабочих элементов УТ при трении.

Режим трения в зоне контакта рабочих поверхностей элементов УТ характеризуется отношением толщины h_0 смазочного слоя к среднему квадратическому отклонению профиля поверхностей трения. В качестве параметра λ, характеризующего режим трения в контакте качения, принимается отношение

$$\lambda = \frac{h_0}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}},$$

где R_{a1} и R_{a2} – средние арифметические отклонения профиля контактирующих поверхностей.

Известно, что при $\lambda < 1$ действует режим граничной смазки, значительно повреждаются поверхности трения и нельзя обеспечить работоспособность быстроходного подшипника.

При $1 < \lambda < 1{,}5$ происходит изнашивание поверхностей. В этих условиях существует смешанное трение – сочетание граничного и жидкостного. При $1{,}5 < \lambda < 3$ кратковременно возникает контактное трение, однако в целом режим смазки близок к жидкостному. При $3 < \lambda < 4$ смазка почти полностью жидкостная, изнашивание крайне незначительно. При $\lambda > 4$ смазка полностью жидкостная.

Взаимодействие шероховатых поверхностей при трении реализуется на пятнах контакта, представляющих собой контакт двух неровностей. Связь между нагрузкой и деформацией шероховатого слоя является существенно нелинейной.

При наличии контакта рабочих элементов шарикоподшипникового УТ (прорыв смазочного слоя) возникают пульсации моментов трения, определяемых гистерезисными потерями, потерями на трение скольжения, верчения, трения о смазку. Изменение во времени момента трения о смазку представляет собой импульсный процесс, где при контактировании поверхностей УТ момент трения о смазку принимает минимальное значение, а при скольжении по смазке – максимальное. В момент контакта поверхностей суммарный момент трения подшипникового узла максимален, в момент скольжения по смазке – минимален [5].

Увеличение Θ_S связано с повышением объемной температуры Θ_V и температурной вспышки $\Delta\Theta$, то есть $\Theta_S = \Theta_V + \Delta\Theta$. Температурные вспышки $\Delta\Theta$ вызваны ни чем иным, как флуктуациями суммарного момента трения в процессе контактирования.

Температура в УТ существенно влияет на вязкость масла и сорбционное действие присадок, и с этой точки зрения рост температуры интенсифицирует усталостное изнашивание материалов УТ и смазок. Очевидно, что при не-

больших относительных скоростях скольжения температура УТ существенно не повышается. Следует отметить, что для хорошо механически обработанных поверхностей существует температура перехода (для стали около 140 °С), при которой износостойкость рабочих поверхностей УТ возрастает.

С увеличением температуры УТ вязкость его смазочного слоя уменьшается, несущая способность падает.

Кроме температурного воздействия на изменение несущей способности смазочного слоя оказывают следующие факторы:

– изменение вибрационного состояния УТ;

– наличие продуктов износа в смазке;

– изменение состояния смазки вследствие деструкции молекул, высыхания жидкой фазы смазки и коксования;

– изменение размеров и формы элементов УТ в результате процессов износа и старения.

ТС УТ изделий приборостроения определяется главным образом состоянием смазочного слоя и динамической нагрузкой, действующей на элементы трибологической системы.

Динамическая нагрузка P, действующая на УТ, складывается из статической нагрузки $P_{ст}$ и вибрационной $P_{вибр}$, обусловленной как собственной вибрацией функционирующего изделия, так и внешними вибрационными воздействиями

$P=P_{ст}+ P_{вибр}$.

Если несущая способность N уравновешивает динамическую нагрузку P, то есть $N \geq P_{ст} + P_{вибр}$ – контакт между рабочими поверхностями элементов УТ отсутствует. При $N < P_{ст} + P_{вибр}$ происходит прорыв смазочного слоя, начинается контактирование рабочих поверхностей УТ и их изнашивание.

Конатктирвоание элементов УТ представляет собой нестационарный квазипериодический во времени процесс и зависит от микрогеометрии сопряженных поверхностей, толщины разделяющих их смазочного слоя и площади фактического контакта, определяющейся действующей в контактной зоне нагрузкой. Квазипериодичность процесса контактирования обусловлена различными сочетаниями дефектных участков поверхностей, попадающих в контактную зону в каждый момент времени. При этом явление прорыва смазочной пленки тем ярче выражено, чем больше величина дефекта сопряженных поверхностей.

Пульсации контактирования сказываются на скачкообразном изменении вибраций УТ.

Оценить ТС УТ в условиях его функционирования позволяет электрический метод контроля [5], в котором используется следующие свойства УТ: взаимодействующие поверхности являются токопроводящими, а смазочный слой между ними – диэлектрик. Подключив к сопряженным деталям источник питания и измерительный прибор, можно определить нестабильность состояния слоя смазки.

В момент минимального значения измеряемого сопротивления $R=R_{min}$ происходит прорыв смазочного слоя, при максимальном сопротивлении $R=R_{\max}$ элементы УТ разделены смазкой. Измерение сопротивления слоя по переменному току позволяет дать оценку средней толщины смазочной пленки. При измерении по постоянному току обычно учитывают функцию контактирования и определяют число и длительность электрических замыканий. Функция контактирования e представляет собой отношение суммарной длительности τ контактирования за период T наблюдения к продолжительности этого периода $e = \tau/T$ и служит для количественной оценки процесса контактирования УТ.

Процессы физического старения деталей трибологической системы оказывают большое влияние на ТС, несущую способность смазочного слоя и состояния рабочих поверхностей УТ. Основными процессами физического старения являются трибологическое изнашивание и коррозия. Оба процесса действуют одновременно с разной интенсивностью. Физическое старение может быть вызвано разрушением поверхностного слоя из-за декогезии материала, изменением формы без потери массы. Износ может быть вызван потерей массы, пропорциональной пути трения, или накоплением необратимых изменений, вызывающих упругие и пластические деформации, являющиеся зародышами декогезии. Коррозионное разрешение УТ происходит в результате химических, электромеханических и физико-химических процессов, вызванных действием макро- и микросреды.

Таким образом, при выработке ресурса узлов трения вследствие наличия дефектов формы поверхностей, разделенных смазкой, происходит их неравномерный износ. Смазочный слой со временем испаряется, загрязняется, микрочастицами, образующимися в процессе касания микронеровностей рабочих поверхностей УТ, изменяет свои электрические, химические и физические свойства. При этом несущая способность, характеризующая подъемную силу смазочной пленки, постепенно уменьшается, что приводит к увеличению динамической нагрузки со стороны взаимодействующих поверхностей и прорывам смазки, при которых проис-

ходят непосредственные касания (контакты) рабочих поверхностей сопряженных элементов. Прерывистое контактирование в свою очередь вызывает нагрев в моменты непосредственного металлического взаимодействия, увеличивается суммарный момент трения и уровень собственной вибрации. Следовательно, все трибологические характеристики систем трения тесно взаимосвязаны между собой. Изменение одной из них влечет за собой изменение других.

Список источников

1. Приборные шариковые подшипники: справочник / Под ред. К. Н. Явленского. М.: Машиностроение, 1981. 351 с.

2. *Горячев И. Г., Добычин М. Н.* Контактные задачи в трибологии. М.: Машиностроение, 1988. 256 с.

3. *Коднир Д. С., Жильников Е. П., Байбородов Ю. И.* Эластогидродинамический расчет деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 160 с.

4. *Розенберг Ю. А.* Влияние смазочных масел на надежность и долговечность машин. М.: Машиностроение, 1970. 232 с.

5. *Furey M.* Metallic contact and grietion between aliding surfaces. ASLE Frans, 4, 1978.

УДК 621.3.049.77(035.5) **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-299-301**

К. В. Епифанцев*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РАЗРАБОТКА БЕСКОНТАКТНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ГЕОМЕТРИИ НА КРУГЛОМЕРАХ

Измерение геометрических дефектов детали осуществляется в приборах для измерения контура и формы с помощью контактных датчиков-кругломерах (рис. 1). В приборах данного вида используются твердосплавные щупы для анализа контура детали, дефектов обработки, но с течением времени операторы данных машин начинают испытывать ряд сложностей при ее обслуживании – с поставками датчиков из Европы могут быть задержки, кроме того, контактные щупы изнашиваются, скалываются, истираются, что также негативно сказывается на результате измерения, процесса калибровки приборов. В исследовании описывается процесс подбора прототипа бесконтактного датчика для кругломера.
Ключевые слова: *емкостный датчик, измерение геометрии, погрешность, микроконтроллер.*

K. V. Epifantsev*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg state University of aerospace instrumentation*

DEVELOPMENT OF A CONTACTLESS SENSOR FOR MEASURING GEOMETRY DEFECTS ON ROUNDTEST

The measurement of geometric defects of a part is carried out in devices for measuring contour and shape currently using contact sensors (Figure 1): round meters, profilometers, profilographs and conturogafs. In devices of this type, carbide probes are used to analyze the contour of the part, processing defects, but over time, operators of these machines begin to experience a number of difficulties in its maintenance – there may be delays with their deliveries from Europe, secondly, contact probes wear out, chip off, wear off, which also negatively affects the measurement result, the instrument calibration process. The study describes the process of selecting a prototype of a contactless sensor for a roundtest.
Keywords: *power supply, voltage quality, chips, algorithm of operation.*

Основная цель работы – создать прототип бесконтактного емкостного датчика для измерения дефектов формы для импортозамещения контактного щупа австрийского производства.

В процессе разработки датчика собственной оригинальной конструкции были проанализированы аналогичные типы датчиков для бесконтактного контроля геометрии деталей. В работах [1]–[3] отмечена зависимость между емкостью и расстоянием наблюдаемого объекта, представленная на рис. 1. Анализируя исследования [1]–[3], можно сделать вывод, что есть некоторый выход датчика на режим (стабилизацию, происходящую из-за сопротивления датчика шумам), сопровождающийся резким увеличением емкости в момент минимального расстояния между наблюдаемым объектом и второй пластиной конденсатора (вторая пластина конденсатора – исследуемый объект).

В процессе разработки бесконтактного датчика для измерения дефекта формы была приме-

Рис. 1. Кругломер с контактным датчиком

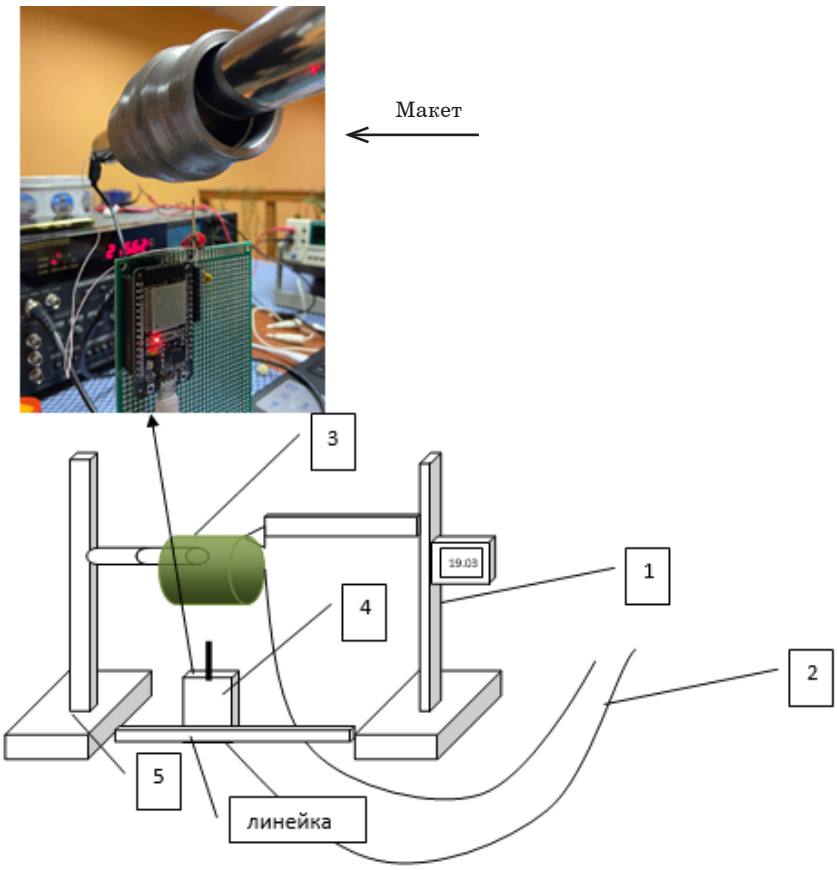


Рис. 2. Экспериментальная установка: 1 – штангенрейсмас; 2 – контактные пробники осциллографа или частотомера; 3 – контролируемая деталь на консоли; 4 – емкостный датчик с латунным щупом; 5 – стойка с контролируемой высотой консоли

на аналогичная схема создания данных преобразователей на основе емкостного датчика, применяемая в виде планарного конденсатора [1]–[3]. В качестве одной из пластин конденсатора была принята деталь, из конструкционной стали – тело вращения, полученной с помощью токарной обработки. Вторая пластина планарного конденсатора – латунный щуп, соединенный с контроллером ESP-32 и кварцевым генератором, получающих питание, не превышающее 6 вольт от USB входа ноутбука, в котором находилась программа для контроллера. Экспериментальная установка описана на рис. 2.

В данном случае провод «-» пробника от частотомера Voltcraft был подключен к детали, положительный вывод был подключен к латунному щупу. При этом возможно измерение с отключенным основным питанием, так как питания, имеющегося в пробнике от частотомера, вполне хватает на измерение детали, однако в среднем показания на частотомере при этом меньше примерно в 100 раз. Основными измерительными приборами для разработанной экспериментальной установки были приняты частотомер MS9150 и осциллограф АКИП (рис. 3).

Рис. 3. Частотомер MS9150 и осциллограф АКИП

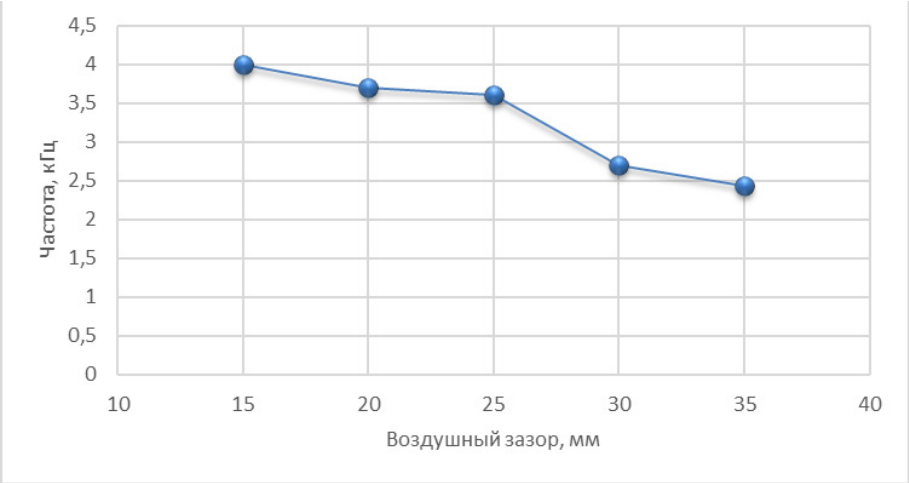


Рис. 4. Выявленная зависимость при измерении детали на частотомере

Установленный конденсатор в макете – 2 пикофарада. Ниже представлена выявленная зависимость (рис. 4). Все значения фиксировались вручную, приближение щупа к прибору фиксировалось штангенрейсмасом, который контролировал, в свою очередь, положение металлической оси, на которой была зафиксирована деталь (рис. 2). При этом были замечены шумовые эффекты, которые требовали значительной стабилизации частоты, около 5 секунд на одно измерение. При этом категорически исключается касание детали рукой, так как это вызывает мгновенное зашумление результата измерения. Ниже на графике была выявлена зависимость частоты от воздушного зазора.

Таким образом, было замечено, что при уменьшении воздушного зазора, частота возрастает. При этом частотомер в дальнейшей серии экспериментов будет заменен на осциллограф АКИП с целью исследования осциллограмм. В настоящее время необходимо получить более устойчивую защиту от помех, в связи с этим для прототипа будет изготовлен корпус из помехозащищенных материалов. Однако уже на данном этапе возможно говорить о работоспособности бесконтактного датчика, реагирующего на расстояние между металлом и щупом прототипа, что в дальнейшем может использоваться для определения вибросмещения детали, а значит может определить дефект формы.

Список источников

1. *Кулманаков Д. С., Пщелко Н. С., Костовский И. П.* Многофункциональной емкостной датчик // Наука настоящего и будущего. 2020. Т. 1. С. 122–125.

2. *Пщелко Н. С., Соколова И. М., Чигирев Д. А.* Бесконтаткный многофункцинальный датчик на основе планарного конденсатора // Техника радиосвязи. 2021. № 3 (50). С. 71–82.

3. *Пщелко Н. С.* Многофункцинальный датчик на основе планарного конденсатора для дистанционного зондирования // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества: тезисы докл. I Российской науч. конф. Омск, 2020. С. 95–96.

УДК 539.31 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-302-305**

Д. Ю. Ершов*
кандидат технических наук, доцент
И. Н. Лукьяненко*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МЕТОД РАСЧЕТА КОЛЕБАНИЙ БАЛОК И ПЛАСТИН С ТОЧЕЧНЫМ ОПИРАНИЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ГРИНА

Рассматривается построение динамическое функции Грина и ее применение для определения спектра собственных частот и форм колебаний балок и пластин различной конфигурации, несущие распределенные и сосредоточенные массы, при креплении балок и пластин на жестких или упругих точечных опорах.
Ключевые слова: *функция Грина, свободный элемент, механическая система, кольцевая пластинка, динамическая функция Грина, расчет балок.*

D. Y. Ershov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
I. N. Lukyanenko*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

CALCULATION METHOD OF BEAMS AND PLATES WITH POINT SUPPORT USING DYNAMIC GREEN'S FUNCTION

The construction of dynamic Green's function and its application to determination of natural frequencies and vibration modes of beams and plates of different configurations, carrying distributed and concentrated masses, when beams and plates are fixed on rigid or elastic point supports are considered.
Keywords: *Green's function, free element, mechanical system, circular plate, dynamic Green's function, beam calculation.*

Рассматриваются балки, круглые, кольцевые или прямоугольные пластинки на жестких или упругих точечных опорах (C – коэффициент жесткости опоры), несущие, помимо распределенной массы (m), также сосредоточенные (M), связанные с этими элементами жестко или при помощи амортизаторов (C^{α} – коэффициент жесткости амортизатора) [1], [2].

Решение задачи собственных и вынужденных колебаний таких систем предлагается проводить с помощью динамических функций Грина свободного элемента, то есть соответственно балок и пластин, лишенных всяких связей и дополнительных масс [3]–[5].

Функцию Грина будем строить, используя известный метод разложения движения в ряд по собственным формам колебаний [5]–[7], однако для свободного элемента набор этих форм должен быть дополнен совокупностью форм движения элемента как абсолютно твердого тела с нулевыми частотами. Введем следующие обозначения: a – соответственно длина балки, больший размер прямоугольной пластинки, радиус круглой и наружный радиус кольцевой пластинок; b – соответственно меньший размер прямоугольной и внутренний радиус кольцевой пластинок; $\xi = \frac{x}{a}$; $\eta = \frac{y}{b}$; $u = \frac{x_p}{a}$; $v = \frac{y_p}{b}$; ($\xi = \frac{r}{a}$; ϕ; $u = \frac{r_p}{a}$; ψ) – безразмерные координаты (в декартовой системе, в скобках – в полярной системе координат) соответственно произвольной точки (ξ, η, ϕ) и точки приложения силы (u, v,ψ), при этом ξ, η, u, $v \in [0,1]$ – для балки, прямоугольной и круглой пластинок, ξ, $u \in [\alpha,1]$ – для кольцевой пластинки, ϕ, $\psi \in [0,2\pi]$; $\alpha = \frac{b}{a}$.

Рассмотрим свободный элемент, на который в некоторой точке действует гармоническая, нормальная к срединной плоскости элемента сила $P^*(x,y,t) = P^*\delta(\xi - u, \eta - v)e^{i\omega t}$, где δ –

дельта – функция; ω – круговая частота. При установившемся движении перемещение. произвольной точки пластинки будет также гармоническим $\varpi^* = (x,y,t) = \varpi^*(x,y)e^{i\omega t}$, и амплитуда его будет являться решением дифференциального уравнения

$$L\varpi(\xi,\eta) - \Lambda\varpi(\xi,\eta) = P\delta(\xi - u, \eta - v) \qquad (1)$$

или

$$L\varpi(\xi,\varphi) - \Lambda\varpi(\xi,\varphi) = P\delta(\xi - u, \varphi - \psi), \qquad (2)$$

записанного в декартовой (1) и полярной (2) системах координат в безразмерных величинах $\varpi = \varpi^*/a$, $P = P^* a^4 / D$.

Здесь $L = \dfrac{\partial^4}{\partial\xi^4}$ – для балки, $L = \nabla^2\nabla^2$ – для пластинки (оператор Лапласа

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial\xi^2} + \frac{1}{\alpha^2}\frac{\partial^2}{\partial\eta^2}$$

в декартовой и

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial\xi^2} + \frac{1}{\xi}\frac{\partial}{\partial\xi} + \frac{1}{\xi^2}\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}$$

полярной системах координат); D – жесткость элемента (изгибная для балки, цилиндрическая – для пластинки), $\Lambda = \dfrac{m\omega^2\alpha^4}{D}$ – коэффициент частоты.

Решение уравнений (1) и (2) для балки, прямоугольной и кольцевой (круглой) пластинок ищем в виде

$$\varpi(\xi) = \sum_{n=0_1 0_2 0_3 1\ldots}^{\infty} A_n W_n(\xi), \varpi(\xi,\eta) =$$

$$= \sum_{n=0_1 0_2 0_3 1\ldots}^{\infty} A_n W_n(\xi,\eta), \varpi(\xi,\varphi) =$$

$$= \sum_{n=0_1 0_2 0_3 1\ldots}^{\infty} A_n W_n(\xi,\varphi)$$

где W_n (n=$0_1 0_2 0_3 1\ldots$) – полный набор ортонормированных функций, из которых W_{0n} (n=1, 2 – для балки, n=1, 2, 3 – для пластинки) представляют собой соответственно для балки, прямоугольной и кольцевой (круглой), пластинок формы движения элемента как твердого тела

$$\left.\begin{aligned} W_0 &= 1 \\ W_{0_2} &= \sqrt{3}(1-2\xi) \end{aligned}\right\}; \qquad (3)$$

$$\left.\begin{aligned} W_{0_1} &= \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \\ W_{0_2} &= \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{\alpha}}(1-2\xi) \\ W_{0_3} &= \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{\alpha}}(1-2\eta) \end{aligned}\right\}; \qquad (4)$$

$$\left.\begin{aligned} W_{0_1} &= \frac{1}{\sqrt{\pi(1-\alpha^2)}} \\ W_{0_2} &= \frac{2}{\sqrt{\pi(1-\alpha^4)}}\xi\sin\varphi \\ W_{0_3} &= \frac{2}{\sqrt{\pi(1-\alpha^4)}}\xi\cos\varphi \end{aligned}\right\}. \qquad (5)$$

W_n (n=l, 2, ...) – известные формы собственных колебаний свободного деформируемого элемента, являющиеся решением уравнения $LW_n - \Lambda_n W_n = 0$ совместно с граничными условиями. Здесь

$$\Lambda_n = \frac{m\omega_n^2\alpha^4}{D}.$$

Разложив правую часть (1) и (2) в ряд

$$P(u,v) = \sum_{n=0_1 0_2 0_3 1\ldots}^{\infty} B_n W_n(\xi,\eta)$$

или

$$P(u,\psi) = \sum_{n=0_1 0_2 0_3 1\ldots}^{\infty} B_n W_n(\xi,\varphi),$$

где B_n=PW_n (u, v) и B_n=PW_n (u, ψ); и решив (1) и (2) относительно ϖ, получим соответственно для балки, прямоугольной и кольцевой (круглой) пластинок

$$\varpi(\xi) = P(u)G(\xi,u)$$

$$\varpi(\xi,\eta) = P(u,v)G(\xi,\eta,u,v)$$

$$\varpi(\xi,\varphi) = P(u,\psi)G(\xi,\varphi,u,\psi)$$

где G – функции Грина, имеющие вид

$$G(\xi,u) = \frac{12\xi u - 6(\xi+u) + 4}{-\Lambda} + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{W_n(\xi)W_n(u)}{\Lambda_u - \Lambda}; \qquad (6)$$

$$G(\xi,\eta,u,v)=\frac{12(\xi u+\eta v)-6(\xi+\eta+u+v)+7}{-\Lambda}+$$
$$+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{W_n(\xi,\eta)W_n(u,v)}{\Lambda_n-\Lambda}; \quad (7)$$

$$G(\xi,\varphi,u,\psi)=\frac{1+\frac{4}{1-\alpha^2}\xi u\cos(\varphi-\psi)}{-\pi(1-\alpha^2)\Lambda}+$$
$$+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{W_n(\xi,\varphi)W_n(u,\psi)}{\Lambda_n-\Lambda}. \quad (8)$$

Если в некоторой точке действует сосредоточенный момент W^*, то для балки, прямоугольной и кольцевой (круглой) пластинок соответственно будем иметь

$$\varpi(\xi)=M(u)G^u(\xi,u), \quad (9)$$

$$\varpi(\xi,\eta)=M_y(u,v)G^u(\xi,\varphi,u,v)-M_x(u,v)G^v(\xi,\eta,u,v),$$

$$\varpi(\xi,\varphi)=M_r(u,\psi)G^u(\xi,\varphi,u,\psi),$$

где $M=\frac{M^*a^3}{D}$; M_x, M_y – моменты вокруг осей x и y; M_r – радиальный момент; индексами при G вверху указана переменная, по которой выполняется дифференцирование.

Рассмотрим теперь систему, образованную из свободного элемента в результате наложений на него жестких или упругих связей и присоединения к нему (жестко или упруго на амортизаторах) сосредоточенный масс. Особенности, вносимые этими факторами, отразим в функции Грина. Пусть известна функция Грина для системы с $k-1$ особенностями (G_{k-1}) и пусть в некоторой точке с координатами u_k v_k (или u_k ψ_k) на систему накладывается k – я особенность. Это равносильно действию на систему в той же точке некоторой дополнительной силы P_k^*.

Эта сила определяется как сила инерций сосредоточенной массы:

$$P_k^*=M_k\omega^2\varpi(u_k,v_k),$$

реакция упругой опоры:

$$P_k^*=-c_k\varpi(u_k,v_k),$$

реакция в амортизаторе при упругом подсоединении сосредоточенной массы:

$$P_k^*=c_k^a\frac{\omega^2}{(\omega_k^a)^2-\omega^2}\varpi(u_k,v_k),$$

где $\omega_k^a=\sqrt{\frac{c_k^a}{M_k^a}}$ – парциальная, частота амортизируемой массы.

Для системы с k особенностями выражение для перемещений можно записать в двух вариантах (оба в декартовой системе координат):

$$\varpi(\xi,\eta)=P(u,v)G_{k-1}(\xi,\eta,u,v)+$$
$$+P_k(u_k,v_k)G_{k-1}(\xi,\eta,u_k,v_k); \quad (10)$$

$$.\varpi(\xi,\eta)=P(u,v)G_k(\xi,\eta,u,v). \quad (11)$$

Сопоставляя (11) и (10) и используя приведенные выше значения P^*, а также тот факт, что в случае жесткой шарнирной опоры $\varpi(u_k, v_k)=0$, получим следующую рекуррентную формулу для функции Грина с k особенностями

$$G_k(\xi,\eta,u,v)=G_{k-1}(\xi,\eta,u,v)+$$
$$+\frac{G_{k-1}(u_k,v_k,u,v)G_{k-1}(\xi,\eta,u_kv_k)}{a_k-G_{k-1}(u_kv_k,u_k,v_k)}, \quad (12)$$

где $a_k=0$ – для жесткой шарнирной опоры;

$a_k=1/\rho_k$ – для упругой опоры (амортизатора);

$a_k=1/\mu_k\Lambda$ – жестко присоединенной сосредоточенной массы;

$$a_k=\left(\rho_k^a/\mu_k^4-\Lambda\right)/\rho_k^a\Lambda$$

для упруго присоединенной сосредоточенной массы. Здесь

$$\rho_k=\frac{c_ka^2}{D},\quad \rho_k^a=\frac{c_k^aa^2}{D},$$

μ – отношение массы M к массе пластинки.

Аналогично выглядит запись в полярной системе координат.

Особенностью обобщенной динамической функция Грина являются ложные нули и бесконечные разрывы, представляющие собой информацию о собственных частотах системы предыдущего шага «дополнения». С каждым последующим шагом особенность первого вида переходит в особенность второго вида и т. д. Таким образом, коэффициенты частот системы k-го шага «дополнения» будут выделены исключением из общего числа нулей k-го шага числа разрывов $k-1$ шага.

Форма колебаний системы, k-го шага описывается функцией Грина $(k-1)$-го шага при подстановке координат точки k-й особенности.

Расчет вынужденных колебаний целесообразно проводить по формуле (11) с помощью предварительно построенной для исследуемой системы обобщенной функции Грина.

Метод динамической функции Грина позволяет наряду с расчетом свободных колебаний сложных систем на ЭВМ сравнительно простые системы рассчитывать с помощью простейших инструментов (например, логарифмической линейки). Точность метода зависит от числа собственных форм W_n, удерживаемых в (6)(8). Сходимость метода неплохая Например, для обычной однопролетной балки (точное решение $\Lambda_n = n^4\pi^4$), частоты симметричных форм следуют из решения уравнения

$$\frac{2}{-\Lambda}+\frac{8}{500{,}56-\Lambda}+\frac{8}{14617{,}6-\Lambda}+ \\ +\sum_{n=5,7,\ldots}^{\infty}\frac{8}{\left(\pi\frac{2n+1}{2}\right)^4-\Lambda}=0,$$

полученного из условия отсутствия перемещения на опорах. Удерживай в уравнении два первых слагаемых, то есть решив уравнение первого порядка, получим Λ_1=100,12 (с ошибкой для первой частоты в 1,2 %); удерживая три слагаемых, получим Λ_1=96,1 (с ошибкой в 0,62 %) и т. д. Аналогично получаются высшие, частоты. Особенно эффективен этот метод при расчете балок на упругих опорах и расчете пластинок, закрепленных в отдельных точках.

Метод обобщенной динамической функции Грина оказывается эффективным при расчете сложных механических систем с использованием современных математических программных средств (например, Math Lab или Mathcad) [8], [9], когда составление и раскрытие определителя, порядок которого обычно высок, заменяется циклическим вычислительным процессом по рекуррентной формуле. Это позволяет автоматически присоединять любое количество опор и масс к механической системе без существенных ограничений на оперативную память компьютера и обеспечить необходимую точность расчетов.

Список источников

1. *Добрышкин Ю. А., Сысоев О. Е., Сысоев Е. О.* Эффектные испытательные стенды для исследования собственных колебаний разомкнутых цилиндрических оболочек и пластин. Труды МАИ. 2020. № 113. С. 1.

2. *Ахтямов А. М.* Идентификация видов и параметров закрепленной механической системы // Сб. трудов 12 Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механике. 2019. Т. 1. С. 431–432.

3. *Жураев Ш. И., Умаров А. О.* Собственные и вынужденные колебания деформируемых систем // Вестник научных конференций. 2020. № 7–1 (83). С. 39–42.

4. *Турищев Л. С.* К определению собственных частот свободных колебаний балок // Вестник Полоцкого государственного университета. 2015. № 8. С. 40–43.

5. *Оробей В. Ф., Дащенко А. Ф., Немчук А. О., Лимаренко А. М.* Фундаментальные функции, функция Грина и вектор нагрузок для тонкостенных стержней // Научные труды SWORLD. Т. 2. № 44. Одесса. 2016. С. 50–58.

6. *Индейкин А. В., Креминская М. Д. Быстрова Т. А.* Метод функций Грина в решении краевых задач механики стержней. Тезисы доклада 10-й Международной конференции «Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте». СПб., 2017. С. 51–53.

7. *Умушкин Б. П., Москаленко Л. В.* О выборе параметров подкрепляющих элементов пластин и оболочек, максимально повышающих жесткость системы // Научный вестник. МГТУ ГА. 2010. № 161. С. 111–118.

8. *Ковалев А. Д., Киселев Д. А.* Возможности программы Matlab // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сб. трудов. 2021. Т. 1. С. 85–86.

9. *Ощепков А. Ю.* Системы автоматического управления: теория применения, моделирование в Matlab: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2013. 208 с.

УДК 621.3.04 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-306-309**

И. Н. Железняк*
кандидат технических наук, доцент
П. А. Лукичев*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПОСТРОЕНИЕ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

Рассматривается структурная схема привода переменного тока. Строится компьютерная модель в среде Matlab Simulink в соответствии с характеристиками, рассчитанными ранее. Строятся графики, отражающие основные параметры при пуске.
Ключевые слова: *асинхронный двигатель, привод переменного тока, пусковые характеристики, Matlab Simulink.*

I. N. Zhelezniak*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
P. A. Lukichev*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

PLOTTING OF STARTUP CHARACTERISTICS OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR IN THE MATLAB SIMULINK ENVIRONMENT

The article discusses the block diagram of the AC drive. A computer model is built in the Matlab Simulink environment in accordance with the characteristics calculated earlier. Graphs are built that reflect the main parameters at startup.
Keywords: *asynchronous motor, alternative current drive, startup characteristics, Matlab Simulink.*

Появление полупроводниковой базы позволило создавать современные приводы, обладающие гораздо большей эффективностью, чем приводы постоянного тока. Кроме того, они гораздо более надежны и требуют меньше обслуживания – то есть требуют меньше затрат во время службы.

Использование полупроводниковых элементов позволяет полностью отказаться от механических контакторов, которые требуют периодической замены из-за того, что при разрывании цепи возникает дуга, приводящая к постепенному выгоранию контактов. Также применяемое при этом раздельное управление крутящим моментом на валу двигателя позволяет отказаться от механического дифференциала и карданного вала. Меньшее же число трущихся деталей повышает надежность всей конструкции.

Структура привода переменного тока представлена на рис. 1. Синхронный генератор приводится во вращение дизельным двигателем, переменное трехфазное напряжение выпрямляется неуправляемым выпрямителем. Пульсации могут сглаживаться емкостью. Выпрямленное напряжение подается на два инвертора, по одному на каждое ведущее колесо. Управление осуществляется изменением частоты подаваемого на двигатели переменного напряжения. При разгоне инвертор увеличивает частоту тока, при торможении уменьшает. При этом тяговый двигатель работает как асинхронный генератор, выработанная при этом электроэнергия передается на тормозной резистор. Чоппер – устройство, позволяющее регулировать величину тока изменением скважности подаваемого на него управляющего напряжения, отвечает за интенсивность торможения.

В качестве исходных данных для проектирования электродвигателя взяты характеристики тягового электродвигателя ТАД-5, применяющегося на карьерных самосвалах БелАЗ грузоподъемностью 160 т. Его характеристики представлены в табл. 1.

По имеющимся данным был проведен расчет, в результате которого были получены данные, необходимые для построения компьютерной модели и проведения экспериментов. Эти данные представлены в табл. 2. Также были по-

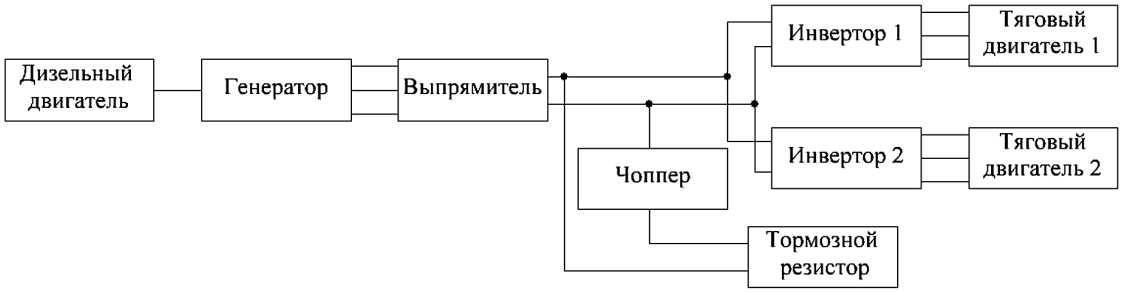


Рис. 1. Структура электромеханического привода переменного тока

Таблица 1

Исходные данные для проектирования электродвигателя

Номинальная мощность	610 кВт
Частота питающей сети	126,67 Гц
Напряжение сети	660 В
Число пар полюсов	2
Число фаз	3
Внешний диаметр статора	750 мм

Таблица 2

Данные для моделирования

Скорость вращения магнитного поля	397 рад/с
Номинальный момент нагрузки	1534Н*м
Момент инерции	8,5 кг*м^2
Сопротивление статора	0,026 Ом
Индуктивность статора	0,535 мГн
Приведенное сопротивление ротора	8,19 мОм
Приведенная индуктивность ротора	0,29 мГн

строены графики пусковых и рабочих характеристик. Они представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

В качестве модели используется *г*-образная схема замещения асинхронного электродвигателя (рис. 4). Параметры схемы замещения находятся по основным уравнениям

$$\left(L_S + L'_R\right)\frac{di_2}{dt} + i_2\left(R_S + R'_R + R'_R\left(\frac{1-s}{s}\right)\right) = U; \quad (1)$$

$$J\frac{d\varpi}{dt} = M_{ДВ} - M_H. \quad (2)$$

Модель строится в среде Simulink в соответствии с уравнениями (1), (2), а также параметрами, приведенными в табл. 2.

Увеличение вращающего момента двигателя сопровождается соответствующим увеличением тока ротора. С увеличением скольжения возрастает фазный угол приведенного тока ротора, что приводит к увеличению реактивного тока двигателя, практически равного сумме индуктивного намагничивающего тока и реактивной составляющей приведенного тока ротора. В данной модели намагничивающий ток не учитывается. В связи с ростом активной и реактивной составляющих тока статора по-

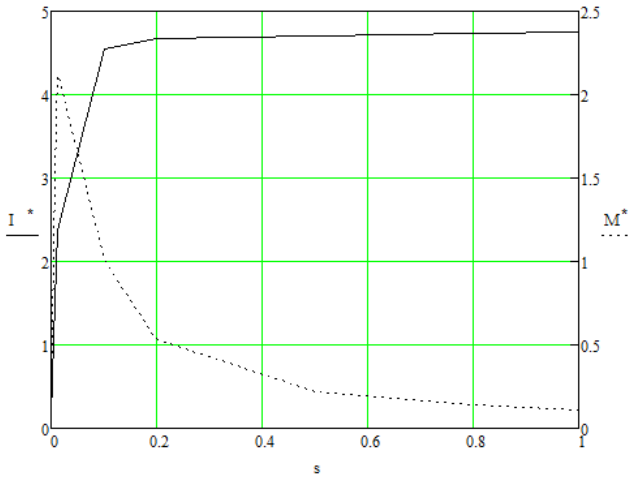


Рис. 2. Пусковые характеристики двигателя

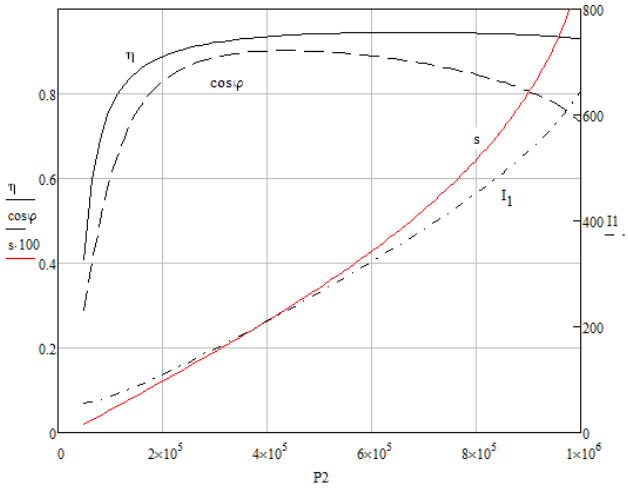


Рис. 3. Рабочие характеристики двигателя

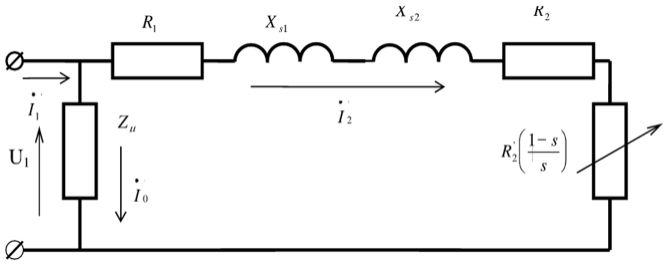


Рис. 4. Г-образная схема замещения асинхронного электродвигателя

следний также возрастает при увеличении нагрузки на валу. Увеличение токов ротора и статора обусловливает возрастание потерь в меди обмоток.

У двигателей нормального исполнения с короткозамкнутым и с фазным роторами при нормальной работе с закороченным реостатом угловая скорость ротора при изменении нагрузки в пределах номинальной изменяется незначительно и поэтому мощность на валу увеличивается практически пропорционально моменту сопротивления. В связи с увеличением реактивного тока двигателя при увеличении нагрузки увеличивается реактивная мощность, потребляемая из сети.

Для исследования свойств рассчитанного электродвигателя построим при помощи модели некоторые зависимости. На рис. 6 представлен график зависимости тока статора от времени при прямом пуске. На 2 секунде двигатель подключается к номинальной нагрузке. По графику видно, что кратность пускового тока чуть

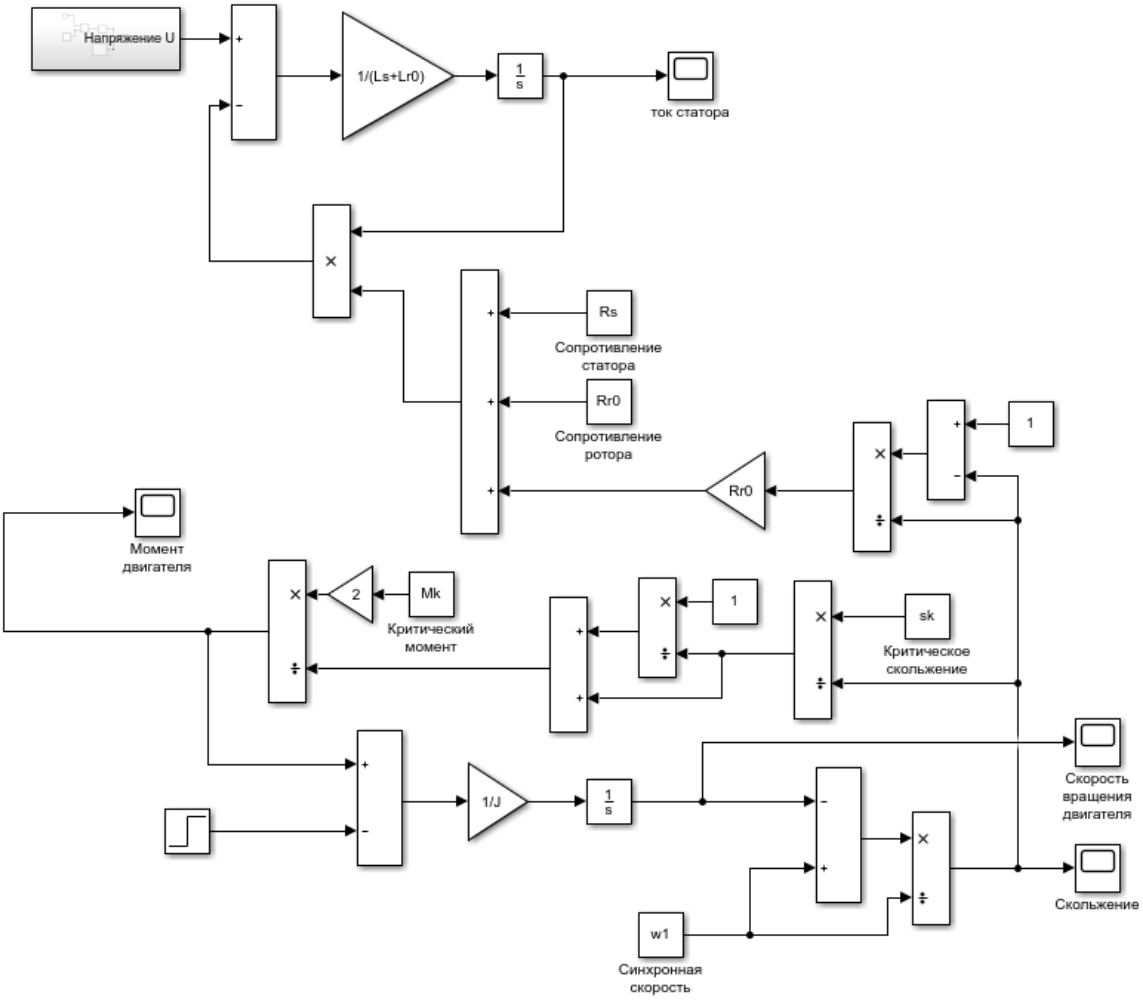


Рис. 5. Модель асинхронного электродвигателя

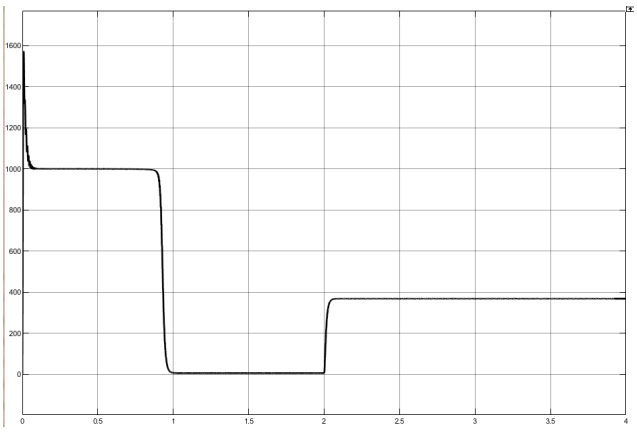


Рис. 6. Действующее значение тока статора при прямом пуске

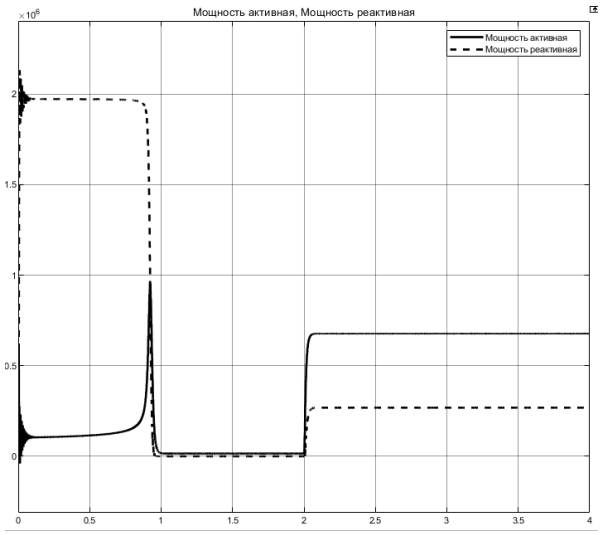


Рис. 7. Зависимости активной и реактивной мощностей от времени

больше 2, что примерно равно соответствующему значению на рис. 2.

На рис. 7 представлены графики зависимости мощностей от времени. По ним видно, что двигатель потребляет значительное количество реактивной энергии при пуске и при работе. Следовательно, для снижения нагрузок должны применяться управляемые компенсаторы реактивной мощности – конденсаторные батареи.

Список источников

1. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / Под ред. И. П. Копылова. 4-е изд., исправ. и доп. М.: Высшая школа, 2005. 767 с.

2. *Забоин В. Н., Суханов В. В.* Расчет параметров схем замещения, рабочих и механических характеристик асинхронных двигателей с фазным ротором: учеб. пособие. СПб.: Нестор, 2005. 39 с.

3. Электропривод переменного тока: учеб. пособие / А. Ю. Чернышев, Ю. Н. Дементьев, И. А. Чернышев и др. Томск, 2011. 213 с.

УДК 67.05 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-310-314**

К. С. Исаков*
магистрант
В. В. Булатов*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МОДЕРНИЗАЦИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО СТАНКА ДЛЯ НАМОТКИ ПРОВОЛОКИ

Приведены результаты модернизации станка для намотки проволоки, выполнен анализ существующих решений передачи крутящего момента, разработана трехмерная модель станка, осуществлен подбор оборудования, произведен расчет ременной передачи, введены в эксплуатацию два опытных образца станка с разными принципами изменения скорости намотки проволоки.
Ключевые слова: *проволока, катушка, 3D-модель, станок для намотки, электропривод, ременная передача.*

K. S. Isakov*
Postgraduate Student
V. V. Bulatov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

MODERNIZATION OF THE UNIVERSAL WIRE WINDING MACHINE

The article presents the results of the modernization of the wire winding machine, the analysis of existing solutions for the transmission of torque, the construction of a three-dimensional model of the machine, the selection of machine elements, the calculation of the belt drive, the commissioning of a prototype, the comparative analysis of two versions of machines with different principles of speed change winding wire.
Keywords: *wire, coil, 3D-model, winding machine, electric drive, belt drive.*

В ходе работы над универсальным станком для намотки проволоки [1] была разработана конструкция, которая по всем характеристикам превосходит аналоги. Разработанный станок позволяет автоматизировать производство катушек металлической проволоки, а также способен в кратчайшие сроки и с минимальными затратами ресурсов и времени перестроиться под производство металлической проволоки d=[0.4÷2.5] мм, лески, и бичевки [2]. Была собрана серия станков для намотки проволоки в количестве 8 штук и введена в эксплуатацию.

Универсальные станки для намотки проволоки, работающие от сети 380 В с регулировкой скорости частотным преобразователем и контролем длины проволоки датчиком Холла, получили сокращенное название УНСЧХ-380 (рис. 1).

Станки отработали от 6000 до 12 000 циклов намотки. По результатам опытной эксплуатации была собрана база неисправностей и конструктивных недостатков:

– станок УНСЧХ-380 имеет элементы, подверженные электромагнитным помехам и механическому загрязнению, из-за чего со временем точность намотки станка снижается. На данный момент погрешность намотки находится в пределах 5–9 %;

– при эксплуатации станков появилась необходимость в техническом обслуживании электронных компонентов, который должен осуществляться специально обученным персоналом; не обеспечивается точность намотки проволоки на катушку в пределах 5 % на протяжении 6000 циклов;

– появилась необходимость в использовании отечественного оборудования, запчастей и материалов.

При разработке новой серии станков следует проработать следующие вопросы:

– замена программного контроля длины наматываемой проволоки на ограничение по времени работы программы;

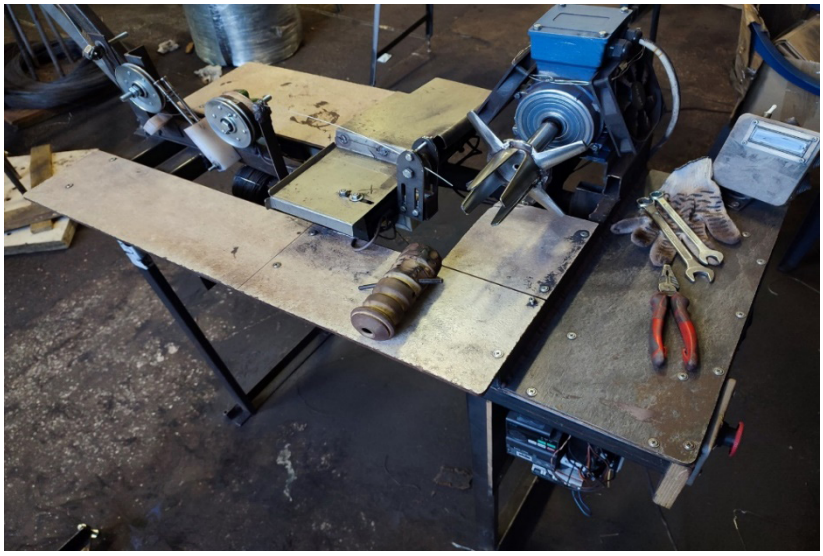


Рис. 1. Станок УНСЧХ-380

– замещение частотного преобразователя ременной передачей;

– смена трехфазной сети на однофазную;

– разработка нового блока равномерной намотки проволоки.

Исходя из всего вышеперечисленного, было предложено разработать прототип новой серии станков.

Проектируемый станок получил название УНРПВ-220. В конструкцию станка входит асинхронный двигатель питанием 220 В, который передает крутящий момент на выходной вал посредством ременной передачи. В ходе исследования было решено, что контроль длины намотки проволоки можно осуществлять временной отсечкой, которой сможет управлять оператор станка. Помимо этого, данный способ контроля длины наматываемой проволоки позволяет отказаться от использования помехозависимых элементов.

В станке УНСЧХ-380 использовались покупные направляющие ролики из оцинкованной стали d=90 мм, которые были заменены на закаленные ролики d=45 мм, их срок службы как минимум в 8 раз больше, в отличие от покупных. В станке УНРПВ-220 будут также использоваться закаленные ролики, но большего диаметра, для увеличения угла обхвата, что позволяет снизить износ [3].

В [1] была представлена таблица соотношений минимальной скорости электродвигателя и длины наматываемой проволоки на станке УНСЧХ-380, где отражалась минимальная скорость вращения вала электродвигателя с преобразованной частотой ращения, которую мог поддерживать станок. Исходя из этих данных для проведения эксперимента выбран схожий по параметрам электродвигатель и средняя скорость намотки проволоки равная 375 об/мин.

Прототип модернизированного станка с одной скоростью намотки получил название НРПВ-220-Т (рис. 2). Из ряда отечественных асинхронных машин был выбран электродвигатель АИРЕ 63В4 У2 220В (1500 об/мин и 0,37 кВт). Произведем расчет и выбор компонентов

Рис. 2. Ременная передача НРПВ-220-Т

ременной передачи для НРПВ-220-Т с одной скоростью намотки равной 375 об/мин.

Передаточное число

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{1500}{375} = 4, \quad (1)$$

где ω_1 – скорость вращения электродвигателя АИРЕ 63В4 У2 220В, ω_2 – скорость вращения ведомого шкива.

Вал данного электродвигателя имеет диаметр 14 мм, исходя из этого выбираем диаметр ведущего и ведомого шкива из ряда номинальных расчетных диаметров [4]

$$i = \frac{d_2}{d_1} = \frac{200}{50} = 4,$$

где d_1 – диаметр ведущего шкива; d_2 – диаметр ведомого шкива.

Пусковой момент трехфазного электродвигателя [5]

$$M_{\text{пуск}} = 9{,}55 \cdot \frac{P_2 \cdot 1000}{F_1},$$

где $M_{\text{пуск}}$ – пусковой момент электродвигателя; P_2 – номинальная мощность; F_1 – номинальная скорость вращения вала электродвигателя.

Значит, номинальная мощность трехфазного электродвигателя

$$P_2 = M_{1\text{пуск}} \cdot \frac{F_1}{9{,}55 \cdot 1000},$$

где $M_{1\text{пуск}}$ – крутящий момент электродвигателя АИРЕ63В4У2 220В при запуске.

Крутящий момент ведомого вала при запуске

$$M_2 = M_{1\text{пуск}} * 4 = 2{,}64 * 4 = 10{,}56 \text{ Н*м}. \quad (2)$$

Таким образом, скорости вращения на ведомом шкиве уменьшается в 4 раза относительно скорости электродвигателя, а крутящий момент увеличивается в 4 раза.

После проектных расчетов и разработки конструкторской документации был собран прототип станка.

По результатам опытной эксплуатации новой конструкции с ременной передачей точность намотки составляет 5 %, а стоимость станка уменьшилась приблизительно в 3 раза.

Однако НРПВ-220-Т не обладает возможностью изменения скорости намотки. Для реализации этой функции используем блок сверлильного станка. Чтобы провести эксперимент, был создан еще один тестовый вариант станка – УНРПВ-220-Т (рис. 3) на базе сверлильного станка MPBDP16. Согласно данным производителя [6] станок имеет 9 скоростей (280–2350 об/мин), двойную ременную передачу, и в нем используется двигатель 220 В (1400 об/мин и 0,5 кВт). Опытная эксплуатация станка УНРПВ-220-Т подтвердила все заявленные технические требования.

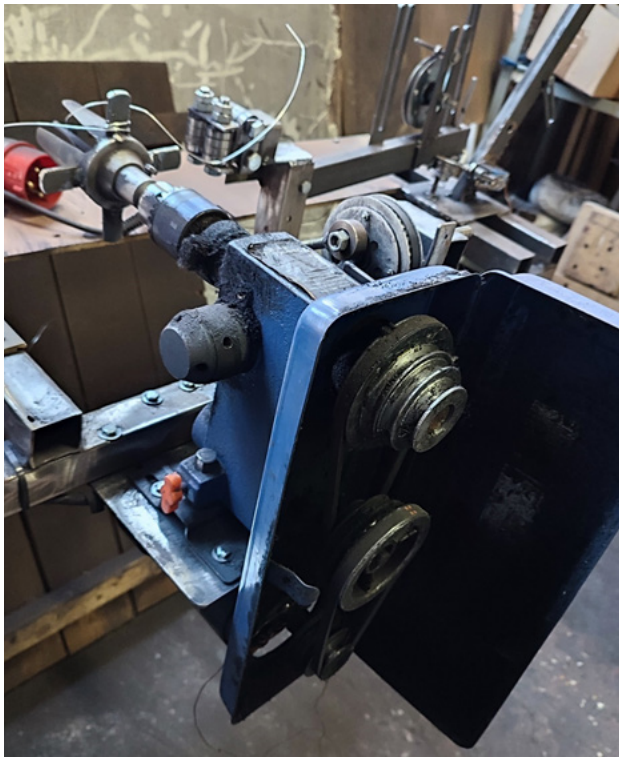


Рис. 3. УНРПВ-220-Т

Далее была разработана трехмерная модель УНРПВ-220 (рис. 4), рассчитана ременная передача для четырех скоростей, подобран двигатель 220 В, конструктивно доработана разборная рама станка, добавлен блок защиты 220 В и изменена программа управления.

Однако эксплуатация станка показала, что увеличение скорости намотки выше 400 об/мин приводит к снижению качества готовой продукции, повышает уровень вибраций и сопровождается нестабильной работой блока контроля, поэтому следует принять значение максимальной скорости намотки проволоки равной 400 об/мин, что соответствует минимальному крутящему моменту (пусковому моменту) ведомого вала

$$M_{\text{пуск}} = M_1 * \frac{\omega_1}{\omega_{\max}} = 2{,}64 * \frac{1500}{400} = 9{,}9 \text{ Н*м}. \quad (3)$$

Помимо этого, в [7] был произведен ряд замеров, согласно которым выяснилось, что для

Таблица 1

Характеристики передач станка УНРПВ-220

№ передачи	Установка ремней	Передаточное число	Скорость $\omega_{iпер}$, об/мин	Крутящий момент $M_{iпер}$, Н*м
1	50-90/50-90	3,24	460	5,6
2	50-100/50-100	4	375	6,92
3	50-112/50-112	5	300	8,55
4	50-125/50-125	6,25	240	10,8

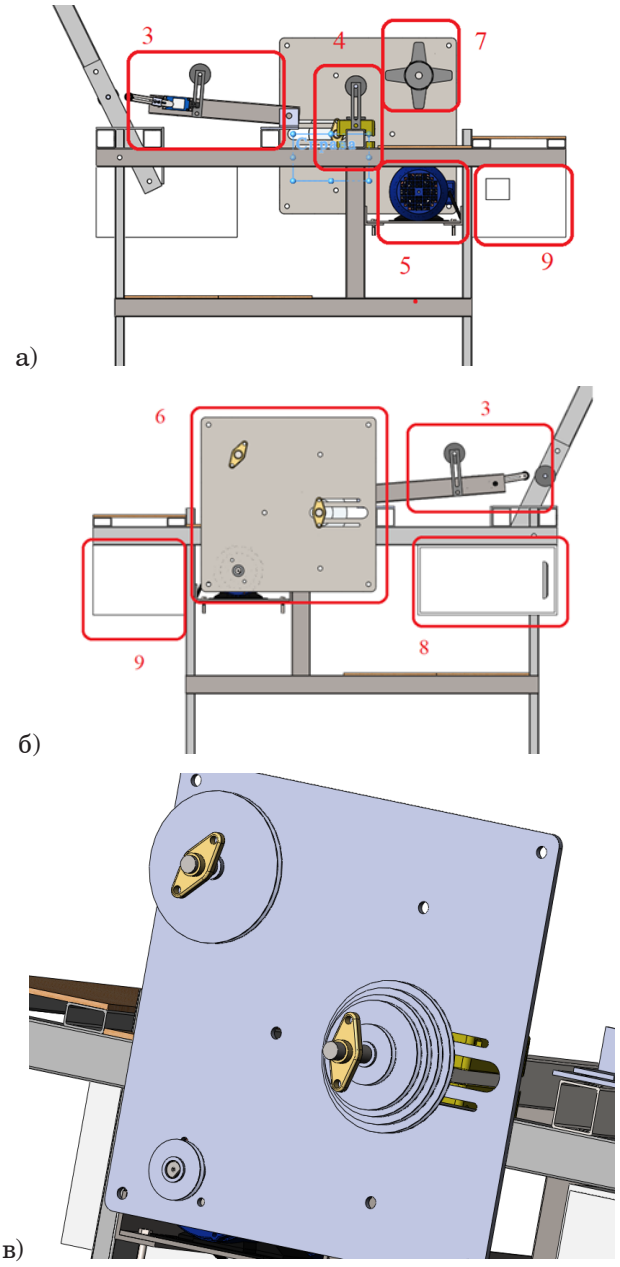


Рис. 4. Основные блоки УНРПВ-220: а – вид спереди; б – вид сзади; в – блок ременной передачи, где 1 – блок разматывания проволоки; 2 – блок выпрямления; 3 – блок контроля; 4 – блок равномерного наматывания проволоки; 5 – блок регулировки высоты двигателя; 6 – блок ременной передачи; 7 – блок наматывания проволоки; 8 – блок управления; 9 – блок защиты 220 В

протяжки проволоки диаметром 1,2 мм через блок выпрямления необходим трехфазный асинхронный электродвигатель 5АИ63В4У2 мощностью 0,37 кВт и крутящим моментом

$$M_{\text{пуск теор}} = 4{,}7 \text{ Н*м}$$

$$\left(\text{с учетом коэффициента запаса } K_з = 2\right).$$

Поскольку при снижении скорости будет происходить увеличение крутящего момента ведомого вала, что лишь уменьшит нагрузку электродвигателя, в расчетах будем использовать значение максимальной скорости $\omega_{мах}$.

Исходя из вышесказанного и согласно (3), делаем вывод, что можно использовать двигатель с пусковым моментом $M_{3пуск} < M_{1пуск}$,, принимаем $M_{\text{пуск теор}} = 5$ Н*м; $\omega_1 = \omega_3$

$$M_{3пуск} = \frac{M_{\text{пуск теор}}\omega_{max}}{\omega_3} = \frac{5 \cdot 400}{1500} = 1{,}33 \text{ Н*м}.$$

Согласно расчетам выбираем асинхронный электродвигатель АИС2Е71А4 220В (0,25 кВт, 1500 об/мин) производства Элмаш (Россия) с пусковым моментом 1,73 Н*м [8].

Шкивы ременной передачи выбраны из ряда номинальных расчетных диаметров. Значение параметров станка на разных передачах представлены в табл. 1. Из таблицы видно, что выбранный двигатель позволяет работать при максимальной скорости $\omega_{1пер} = 460\,rpm$, при этом минимальный крутящий момент, передаваемый на насадку, составляет $M_{1пер} = 5{,}6$Н*м. Таким образом, соблюдается условие $M_{\text{пуск теор}} < M_{1пер}$. Сравнительная характеристика станков УНСЧХ-380 и УНРПВ-220 приведена в табл. 2.

Выводы

произведена модернизация станка для намотки проволоки. Введены в опытную эксплуатацию станки НРПВ-220-Т и УНРПВ-220-Т. Конструктивными особенностями данных станков являются: применение ременной передачи для регулирования скорости электродвигателя, изменен материал направляющих роликов, для контроля

Таблица 2

Характеристика станков УНСЧХ-380 и УНРПВ-220

Станок	УНСЧХ-380	УНРПВ-220
Скорость намотки	300–1500 об/мин	240–460 об/мин
Крутящий момент	≤ 3 Н*м	[5,6÷10,8] Н*м
Регулировка скорости	частотный преобразователь	ременная передача
Электродвигатель	5АИ63В4У2 (0,37 кВт, 1500 об/мин)	АИС2Е71А4 (0,25 кВт, 1500 об/мин)
Метод контроля длины	преобразование показаний датчика Холла	работа программы по временной отсечке
Погрешность намотки после 6000 циклов	7–10 %	4–6 %
Возможные неисправности	– износ механических элементов; – выход из строя асинхронного ЭД 380В, преобразователя частоты, шагового двигателя или драйвера шагового двигателя; – отказ микроконтроллера, блока контроля или датчика Холла	– износ ремней и механических элементов; – выход из строя асинхронного ЭД 220В или ДПТ 12В; – отказ микроконтроллера
Страны-производители компонентов	Россия, СНГ, Китай	Россия, СНГ
Себестоимость	≈59 тыс. руб.	≈37 тыс. руб.

длины ленты используется временная отсечка. Ведется формирование общей базы данных отказов и сбор информации о работе станков.

Список источников

1. *Исаков К. С., Булатов В. В.* Универсальный станок для намотки проволоки // Завалишинские чтения '22: материалы XVII междунар. конф. по электромеханике и робототехнике. СПб.: ГУАП, 2022. С. 167–169.

2. ГОСТ 3282-74. Проволока стальная низкоуглеродистая общего назначения. Технические условия: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 17.01.74 № 144: дата введения 1975.07.01. URL: https: //docs.cntd.ru/document/1200004019 (дата обращения: 15.12.2022).

3. Подробно о ременной передаче: РобоВики. URL: https: //robo-wiki.ru/robotics-blog/belt-drive/ (дата обращения: 10.12.2022).

4. ГОСТ 20889-88. Шкивы для приводных клиновидных ремней нормальных сечений. Общие технические условия: утвержден и введен в действие Государственным комитетом стандартов союза ССР от 01.01.1989. URL: https: //files.stroyinf.ru/Data2/1/4294832/4294832683.pdf (дата обращения: 03.01.2023).

5. Пусковой момент электродвигателя.: Школа электриков. URL: http: //electricalschool.info/spravochnik/maschiny/1925-puskovojj-moment-asinkhronnogo.html (дата обращения: 04.01.2023).

6. Станок вертикально-сверлильный универсальный: Рубикон. URL: https: //maxpro-instrument.ru/stanki-sverlilnye/58-stanok-sverlilnyj-maxpro-mpbdp16.html (дата обращения: 27.12.2022).

7. *Исаков К. С.* Разработка станка для намотки металлической проволоки: выпускная квалификационная работа магистранта кафедры электромеханики и робототехники СПб.: ГУАП, 2021. С. 21–25.

8. Электродвигатель однофазный АИС2Е71А4. Промышленное электротехническое оборудование АГРЕГАТ. URL: https: //agregat.me/odnofaznye-elektrodvigateli-220v/810-ais2e71a4-elektrodlvigatel-0-25-kvt-1500-ob-odnofaznyj-ru/ (дата обращения: 10.12.2022).

УДК 67.05, 551.509.3 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-315-321**

К. С. Исаков*
магистрант
Л. В. Камышева*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРОДЛЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБОРУДОВАНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВ ПРИ ПОМОЩИ ЛОКАЛЬНОГО ВНЕДРЕНИЯ PDM СИСТЕМ

Приведены результаты исследования возможности локального использования PDM технологий, предложен упрощенный вариант внедрения PDM системы, который в современном мире был бы доступен любому предприятию.
Ключевые слова: *PDM, отказ, надежность, качество оборудования.*

K. S. Isakov*
Postgraduate Student
L. V. Kamysheva*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

EXTENDING THE LIFE CYCLE OF FACTORY AUTOMATION EQUIPMENT WITH THE HELP OF LOCAL IMPLEMENTATION OF PDM SYSTEMS

The article presents the results of a study of the possibility of local use of PDM technologies, a simplified version of the implementation of a PDM system is proposed, which in the modern world would be available to any enterprise.
Keywords: *PDM, failure, reliability, equipment quality.*

На сегодняшний день в Российских компаниях по производству оборудования, станков и техники существует проблема недостаточной безопасности и надежности оборудования. Большая часть российских компаний производят технику и оборудование с целью получения максимальной прибыли, снижая стоимость изготовления, материалов и работ. Тем самым создаются условия, при которых количество продаж, число осуществленных платных ремонтов и проданных запчастей увеличивается в разы, а себестоимость оборудования уменьшается, что приводит к увеличению прибыли производителя, но увеличивает материальные затраты потребителя. Также следует отметить, что одной из ключевых составляющих производства качественного оборудования является компетентный кадровый состав предприятия-производителя. Для сравнения, характерной особенностью СССР 1960–80-х годов являлась очень качественная система подготовки кадров, как специалистов высшего уровня для НИИ и высшей школы, так и специалистов высокого класса для конструкторских бюро, цехов, управления производством [1].

В современном мире сложно исправить описанную проблему на уровне потребителя, но ее можно купировать и уменьшить последствия использования оборудования низкого качества. Сделать это можно путем диагностирования отказа оборудования, который уже произошел, либо, исходя из имеющейся базы данных отказов, попытаться предсказать отказ, который произойдет в будущем. Эти вопросы регулируются описательной аналитикой и предиктивной аналитикой [2].

Основные методы, которые включает в себя предиктивное техническое обслуживание (Predictive maintenance, PDM):

– основные методы статистического анализа;

– физическое моделирование;

– использование искусственного интеллекта;

– промышленный Интернет вещей.

Все эти методы позволяют создать сеть датчиков, при помощи которой можно вести непрерывный сбор данных о состоянии оборудования. Имея такую базу данных, можно заранее

узнать, когда произойдет выход из строя одного из элементов оборудования или целого блока. Точность прогнозирования определяется размером базы данных отказов.

Использование PDM с современными методами машинного обучения позволяет увеличить точность и ускорить процесс прогнозирования. Отличным примером внедрения PDM является компания Volvo, перед которой стояла задача сокращения времени ремонта тяжелых грузовиков. На момент внедрения производитель уже обладал большой базой, которая включала в себя данные об отказах основных узлов грузовых автомобилей. Для обработки данных использовалась IBM SPSS совместно с методами машинного обучения, что позволило на основе исторических данных построить цифровые модели состояния различных компонентов автомобилей, близкие к реальному состоянию этих компонентов [3].

Наиболее актуальным вопрос локального внедрения механизмов PDM является для производителей станков, которые нацелены на производство качественного надежного оборудования, а также для предприятий, которые только начинают свою деятельность и неспособны покупать дорогое и надежное оборудование, но хотят максимально долго поддерживать работоспособность этого оборудования.

Сбор данных об отказах и систематизация их по причинам возникновения в условиях существования объекта – важное требование для разработки плана по устранению отказов и проведения мероприятий по предотвращению возможных отказов. Под конец жизненного цикла объекта происходят деградационные отказы, что связано с естественными процессами старения и изнашивания основных компонентов. Даже этот отказы можно спрогнозировать, имея базу данных деградационных отказов и значительно продлить срок службы оборудования [4], [5].

Для приведения в движение различных станков и механизмов на предприятиях тяжелой и легкой промышленности в большинстве случаев используются электрические машины. Также для преобразования электрической энергии в возвратно поступательное движение используются пневмоприводы, гидроприводы и электромагнитные реле.

Согласно ГОСТ 27.002-2015 и ISO 2394: 2015 отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Основные виды отказов классифицируют по [4], [6], [7]:

1) характеру изменения параметров объекта:

– постепенный отказ – отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта;

– внезапный отказ – отказ, характеризующийся скачкообразным переходом объекта в неработоспособное состояние;

2) связи с отказами других объектов [5], [8]:

– независимый отказ – отказ, не обусловленный другими отказами;

– зависимый – отказ, обусловленный другими отказами;

3) причине возникновения отказа:

– конструктивный отказ – отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования;

– производственный отказ – отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии;

– эксплуатационный отказ – отказ, возникший по причине, связанной с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации;

– деградационный отказ – отказ, обусловленный естественными процессами старения, износа, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

Сильное воздействие на интенсивность отказов оказывают условия эксплуатации и температура окружающей среды. Например, при температуре 80 градусов коэффициент уменьшения ресурса пневмоустановок $К_{ур=}(0,1÷0,3)$, а при температуре 25 градусов $К_{ур}=1$. Коэффициент увеличения интенсивности отказов в лабораториях и благоустроенных помещениях $К_{ио}=1$, а на кораблях, автомобилях и машинах железнодорожного транспорта $К_{ио}=(30÷70)$ [9]

При обрыве в цепи обмотки статора магнитный поток будет отсутствовать, а ток будет протекать нулевой. Если обмотки соединены в звезду, то будет невозможно получение пускового момента. Замыкание обмотки статора приведет к срабатыванию защиты от короткого замыкания и остановке рабочего механизма, 17 что с точки зрения безопасности недопустимо. Межвитковое замыкание приводит к нагреванию статора, которое вызывает перегрев электродвигателя и выход его из строя [10]–[13].

Асинхронные двигатели. В большинстве случаев (85–95 %) отказы асинхронных двигателей мощностью свыше 5 кВт происходят из-за повреждения обмоток и распределяются следующим образом: межвитковые замыкания – 93 %, пробой межфазной изоляции – 5 %, пробой пазовой изоляции – 2 %. На подшипниковый узел приходится 5–8 % отказов и неболь-

шой процент связан с такими причинами, как распайка выводных концов, скручивание валов, разрыв стержней ротора и др. Синхронные машины. У машин этого типа наиболее «слабым» узлом с точки зрения надежности является статор. При этом на изоляцию обмотки статора приходится 2,26 % отказов (ТГ) и 3,67 % (ГГ), на места пайки – 0,34 и 0,92 %, на повреждение активной стали статора – 0,15 и 0,64 % соответственно. Машины постоянного тока. Наибольшая доля отказов в этих машинах приходится на коллекторно-щеточный и подшипниковый узлы. Согласно эксплуатационной статистике в среднем около 25 % отказов машин происходит из-за неисправности коллекторов. Другой серьезной причиной является возникновение кругового огня. Доля отказов по этой причине равна 70 % [14]

Наиболее распространенные факторы, влияющие на вероятность отказов реле, электродвигателей, пневмоприводов, гидроприводов и механических составляющих оборудования приведены в табл. 1 [10]–[16]

Из данных табл. 1 можно сделать вывод, что разные рабочие механизмы и оборудование имеют разные факторы, влияющие на нарушение их работы. Все эти процессы, выводящие из строя оборудование, имеют общие черты: большая часть из них является постепенными отказами, переходящими во внезапные отказы, если их не контролировать; их можно отслеживать при помощи контроля за температурой, вибрациями, током, напряжением и явными визуальными отклонениями; весь этот контроль можно осуществлять единой системой датчиков. Таким образом, можно будет выявить постепенный отказ на его начальной стадии, провести внеплановое техническое обслуживание, что позволит увеличить безотказность оборудования.

При проектировании станков и оборудования для обеспечения должного уровня надежности необходимо учесть следующие факторы [10]–[12]:

– применение защитных устройств;

– применение качественной и современной изоляции, пропиточных составов, обмоток;

Таблица 1

Влияние различных факторов на отказы оборудования

Вид оборудования	Основные факторы, влияющие на возникновение отказов
Электрические машины	– образование межвиткового замыкания в одной из обмоток статора – обрыв фаз – износ подшипников – обрыв одной из трех обмоток двигателя – нарушение охлаждения – замыкание обмотки статора на корпус – заклинивание ротора – технологические перегрузки
Электромагнитное реле	– род тока (постоянный или переменный) – значение тока и напряжение – характер нагрузки – частота срабатывания – среда, в которой работают контакты – длительность горения дуги на контактах – продолжительность вибраций контактов и ее первая амплитуда при включении – материал контактов – геометрическая форма контактов – скорость расхождения контактов
Гидропривод и пневмопривод	– износ насоса – нарушение герметичности системы – повышение вязкости РЖГ – попадание воздуха в гидросистему – повышенная вибрация клапанов – перегрев рабочей жидкости или газа – повреждение стенок гидро- или пневмоцилиндра – повреждение или перекос уплотнений штока или поршня – самопроизвольное движение рабочих органов машин
Механические элементы	– диффузионные процессы в объеме и на поверхности твердого тела – перемещение и скопление точечных дефектов в твердых телах – разрыв химических связей цепей макромолекул полимерных материалов – действие поверхностно-активных веществ – структурные превращения в сплавах материалов и др.

– расчет магнитных и электрических нагрузок для обеспечения должного уровня эксплуатационной надежности ЭМ.

Также для поддержания необходимого уровня экономической эффективности и безопасности персонала, следует принять во внимание следующие пути решения [10]:

– проведение технического обслуживания и текущего ремонта электрооборудования;

– применение средств технического диагностирования;

– применение резервированных электрических машин (ЭМ).

В настоящее время существует тенденция пренебрежения этими правилами, а также сокращается общая масса ЭМ, что приводит к более активному износу запасных частей и нарушению температурных режимов: повышение средней допустимой температуры обмоток электрических машин и как следствие – повышение предельно допустимой температуры, что является катализатором для деградационных отказов. В современном мире сложно исправить или предотвратить описанную проблему на уровне потребителя, но ее можно купировать и уменьшить ее последствия путем установки дополнительного охлаждения на корпус электродвигателей.

PDM систему можно использовать, чтобы контролировать температуру ЭМ в условиях работы, для которой она не предназначена или если эксплуатация машины осуществляется:

– в условиях постоянных нагрузок;

– с частыми пусками и остановками;

– под управлением частотных преобразователей с сильным отклонением от стандартного значения частоты вращения вала;

– при повышенной температуре окружающей среды.

Подобное использование асинхронных двигателей значительно ускоряет нагрев обмотки и сокращает срок службы изоляции обмоток двигателя, что приводит к ухудшению диэлектрических и механических свойств материалов и, как следствие, к сокращению срока службы самого двигателя.

Эксплуатация электрических машин без дополнительного охлаждения в перечисленных выше условиях неизбежно приведет к возникновению аварийных ситуаций. Обычно на производстве стараются свести к минимуму риск выхода оборудования из строя и внедряют независимые системы охлаждения электродвигателей.

Благодаря термографии можно наглядно увидеть, как выглядит температурный градиент асинхронного электродвигателя (ЭД) с заводским воздушным охлаждением в режиме непрерывной работы (рис. 1) [17].

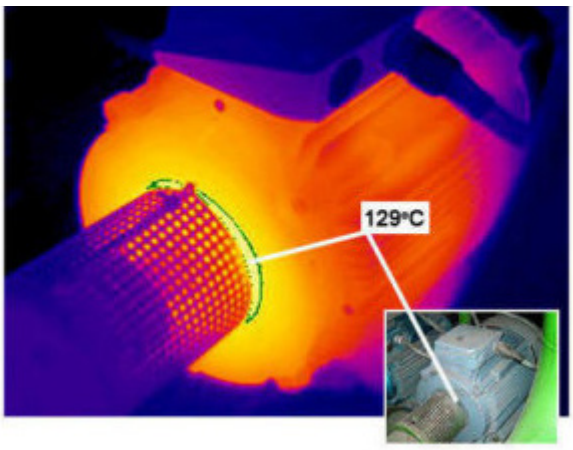


Рис. 1. Градиент температур асинхронного двигателя с встроенным искусственным воздушным охлаждением

Согласно [18] электрические машины могут быть с естественным и искусственным охлаждением (табл. 2), и в том и в другом случае охлаждения может быть недостаточно. Поэтому для решения данной проблемы был проведен анализ готовых решений систем дополнительного охлаждения, которые имеются на рынке охладительного оборудования ЭМ и в открытом доступе сети Интернет.

Таблица 2

Хладагент [18]

Характеристическая буква	Хладагент
A	Воздух
F	Фреон
H	Водород
N	Азот
C	Углекислый газ CO2
W	Вода
U	Масло
S	Любой другой хладагент
Y	Еще не установленный хладагент

На мелких предприятиях нагрузка на электрические машины чаще всего носит резкопеременный характер, имеют место частые запуски. Снижение механической и электрической прочности обмоток ЭМ происходит из-за структурных изменений вследствие превышения максимально допустимой температуры. Разрушение изоляции значительно снижает ее вибро- и влагоустойчивость. После отключения электродвигателя, он начинает остывать, что вызывает выпадение конденсата с содержанием пыли. Влага вызывает коррозию металлических частей (в том числе подшипниковых уз-

Таблица 3

Дополнительное охлаждение электрических машин

Установка воздушного охлаждения в район крыльчатки	Один из самых популярных и доступных способов снизить температуру. За счет увеличения воздушного потока получается значительно снизить температуру обмотки ЭД. В условиях пыльной среды (рис. 2)
Воздушное охлаждение радиатора ЭД	Бюджетный вариант охлаждения. Позволяет увеличить отвод тепла от корпуса электродвигателя. Чаще всего устанавливается в район радиатора (рис. 3)
Жидкостное охлаждение замкнутого типа	Менее эффективный аналог двигателей с водным охлаждением, который позволяет отводить тепло от корпуса при помощи жидкости посредством ее рециркуляции в замкнутом контуре (рис. 4). Встречаются варианты с применением дополнительного радиатора охлаждения жидкости, в том числе установленного на улице. Данный способ имеет много нюансов, сложен в использовании и установке
Использование ЭМ в условиях низких температур окружающей среды	Охлаждение электродвигателя происходит при помощи контакта корпуса с окружающей средой, например, воздух в районах крайнего севера или большие объемы воды. Сложная реализация и снижение времени жизненного цикла из-за ухудшения условий окружающей среды. Хорошим примером является водное охлаждение электродвигателей ледоколов
Искусственное понижение температуры окружающей среды	Самый нераспространенный метод дополнительного охлаждения электродвигателей, применяется при работе оборудования в морозильных камерах. Энергетически неэффективен

Рис. 2. Воздушное охлаждение в район крыльчатки

лов), частицы пыли загрязняют смазку подшипника и в последующем вызывает абразивный износ, который в свою очередь ухудшает температурные режимы [10], [11].

Крупные производители станкостроительной, автомобильной и военной промышленности весьма успешно внедряют системы подобного рода, но в свою очередь это сильно увеличивает итоговую стоимость изделия для потребителя.

Исходя из вышесказанного, можно сделать выводы, что для мелких производств, тяжелой и легкой промышленности, где применяется оборудование, позволяющее автоматизировать процессы производства, можно локально внедрить PDM систему, которая увеличит строк службы и безотказность работы производственных машин.

Так, например, можно осуществлять контроль за температурой электрических машин посредством установки дополнительного охлаждения (табл. 3).

Для внедрения PDM системы на производство понадобится микроконтроллер или ПК, который будет считывать и обрабатывать показания с датчиков температуры, давления, пыли и вибродатчиков. Глядя на совокупность всех этих данных можно будет делать выводы о состоянии оборудования в целом. А после наработки базы отказов (или после внедрения базы данных с другого, схожего по параметрам, производства) станет возможным с некой вероятностью прогнозировать отказы, которые возник-

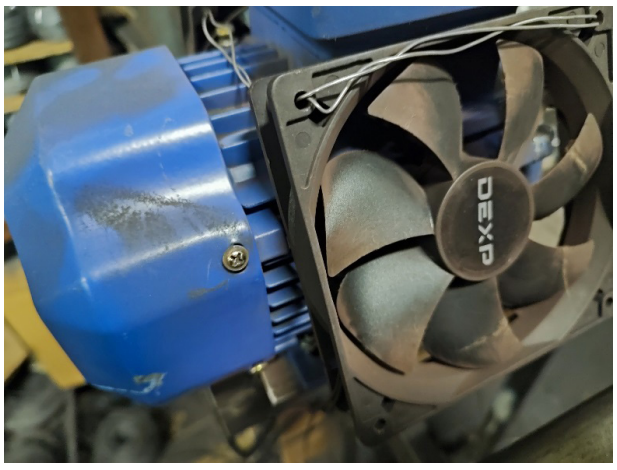


Рис. 3. Воздушное охлаждение в район крыльчатки

Рис. 4. Водное охлаждение замкнутого типа

нуть в оборудовании, отталкиваясь от данных о его состояния на данный момент. На рис. 5 предлагается упрощенная схема внедрения локальной PDM системы для малых производств и предприятий, которые не могут себе позволить дорогостоящее оборудование.

Выводы

Произведен анализ, который показал, что при отсутствии возможности у предприятия закупать дорогостоящее и современное оборудование с предустановленной PDM системой, можно локально разработать и внедрить упрощенную версию системы контроля за состоянием станков. Предложенные варианты дополнительного охлаждения электрической машины, которая работает в непривычном для нее режиме или в неблагоприятных условиях окружающей среды. Использование дополнительного охлаждения в совокупности с системой контроля и автоматиза-

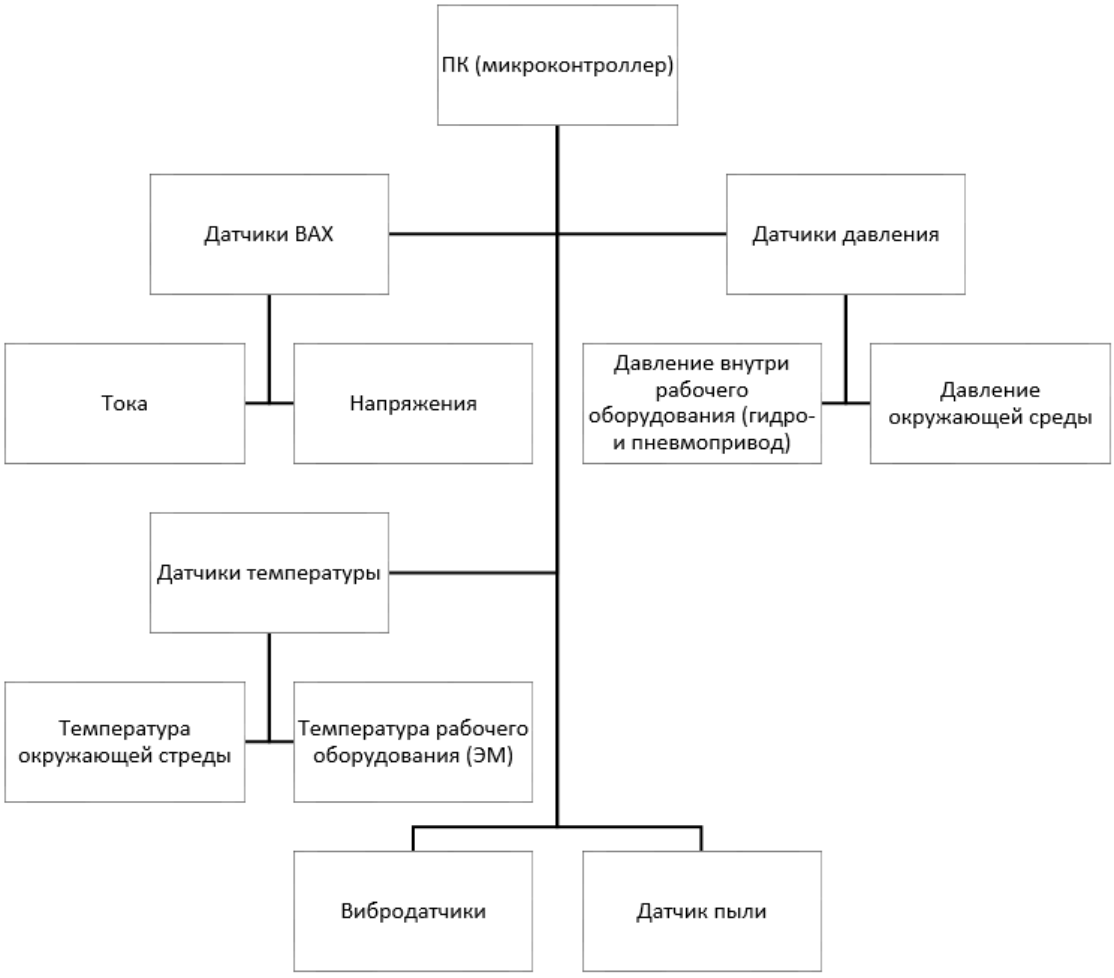


Рис. 5. Упрошенная схема локальной PDM системы

ции производства позволит продлить жизненный цикл оборудования, повысит устойчивость и мощности производства. Предложен упрощенный вариант внедрения PDM системы, который может быть использован любым предприятием.

Список источников

1. Станкостроение в СССР и России: Станкоинструмент. URL: https: //www.stankoinstrument.su/journal/article/6930 (дата обращения: 10.01.2023).

2. Как промышленность осваивает предиктивную аналитику: Runet. URL: https: //runet.news/experts/39097 (дата обращения: 10.01.2023).

3. Минимизация незапланированных простоев Volvo Trucks при помощи датчиков: SAS.com. URL: https: //www.sas.com/ru_ua/customers/volvo-trucks-mack-trucks.html (дата обращения: 03.01.2023).

4. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 24 с.

5. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: стандартов, 1990. 32 с.

6. ISO 2394: 2015. General principles on reliability for structures. 2015.

7. *Половко А. М., Гуров С. В.* Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 702 с.

8. EOQC Glossary. Bern: EOQC. 1988. 24 p.

9. *Гринчар Н. Г., Зайцева Н. А.* Основы пневматических машин: учеб. пособие. М., 2015. 364 с.

10. Обеспечение надежности асинхронных двигателей / П. И. Захарченко, И. Г. Ширнин, Б. Н. Ванеев, В. М. Гостищев. Донецк: Укр. НИИВЭ, 1998. 324 с.

11. *Похолков Ю. П.* Разработка методов исследования, расчета и обеспечения показателей надежности и долговечности изоляции обмоток асинхронных двигателей: дис. … докт. техн. наук. М., 1978. 39 с.

12. *Копылов И. П.* Электрические машины учебник для академического бакалавриата: в 2 т. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2016. 268 с.

13. *Муравьев О. П., Гусев В. В., Шевчук В. П.* Стадия эксплуатации электрических машин в алмазодобывающем комплексе как объективный процесс оценки показателей надежности машин // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 3–4/1. С. 27–37.

14. *Воробьев В. Е., Кучер В. Я.* Прогнозирование срока службы электрических машин: Письменные лекции. СПб.: СЗТУ, 2004. 56 с.

15. Основные неисправности электромагнитных коммутационных аппаратов и методы их устранения: Школа для электрика. URL: http: // electricalschool.info/main/ekspluat/1118-osnovnye-neispravnosti.html (дата обращения: 27.12.2022).

16. *Зорин В. А.* Надежность механических систем: учебник. М.: НИЦ ИНФРА, 2021. 380 с.

17. Termografia. ABECOM. URL: https: //www.abecom.com.br/termografia/ (дата обращения: 18.01.2023).

18. ГОСТ Р МЭК 60034-6-2012. Машины электрические вращающиеся. Методы охлаждения (Код IC). Обозначения. Нац. стандарт РФ, 2014.

УДК 621.31 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-322-325**

Н. В. Кудрявцев*
магистрант
С. С. Налегаев*
кандидат физико-математических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Рассмотрены методы прогнозирования энергопотребления, их виды, особенности и недостатки. Обсуждаются отличия методов на основе машинного обучения от традиционных методов для предиктивных оценок, их ключевые особенности и преимущества.
Ключевые слова: *предиктивная оценка, прогнозирование, энергопотребление, машинное обучение, нейросети.*

N. V. Kudriavtcev*
Postgraduate Student
S. S. Nalegaev*
PhD Sc. Phys.-Math., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

STUDY OF PECULIARITIES OF ENERGY FORECASTING METHODS

The methods of predicting energy consumption, their types, peculiarities and disadvantages are considered. The differences between methods based on machine learning and traditional methods for predictive assessments, their key features and advantages are discussed.
Keywords: *predictive estimation, prediction, energy consumption, machine learning, neural networks.*

Формирование баланса электроэнергии и ее технологическая устойчивость существенно зависят от верного прогнозирования электроэнергетических нагрузок. При этом важно оптимизировать распределение нагрузки между элементами энергосистемы путем регулирования или планирования нагрузки отдельных категорий потребителей. Для правильного построения алгоритма оценки потребления необходимо рассмотреть возможности существующих методов прогнозирования электроэнергии.

Классификация методов прогнозирования осуществляется по трем основным признакам: по степени формализации методов; по общему принципу действия; по способу получения прогнозной информации. По степени формализации методы прогнозирования делятся на формализованные и интуитивные [1]. Первые используется, если информация об объекте исследования в большей степени носит количественный характер, и применимы математические формулы. В ином случае применяются интуитивные (рис. 1).

Интуитивные методы менее результативны в вопросах электроэнергетики по сравнению с теми, что базируются на математических расчетах. Они основываются на аналитиках, сценариях, статистике и зависят от квалификации и особенностей индивидуальных качеств эксперта, что не позволяет полностью обеспечить стабильную обработку данных.

Существуют экспертные методы, они применяются для таких ситуаций, когда исходная информация представлена в недостаточном объеме либо отсутствует, либо не поддается формализации. Примеры таких методов рассматриваются ниже.

Метод экспертных комиссий, или метод Дельфи, представляет собой коллективную оценку, которая осуществляется в процессе совместной работы нескольких экспертов (разрабатывающих прогнозы развития объекта прогнозирования). Он основан на общей оценке от группы и составляется из опроса с целью обоснования оценки их результатов, состоит из нескольких туров, предусматривающих оглашение экспертам результатов предыдущего с целью повторного заключения оценки экспертов в последующем.

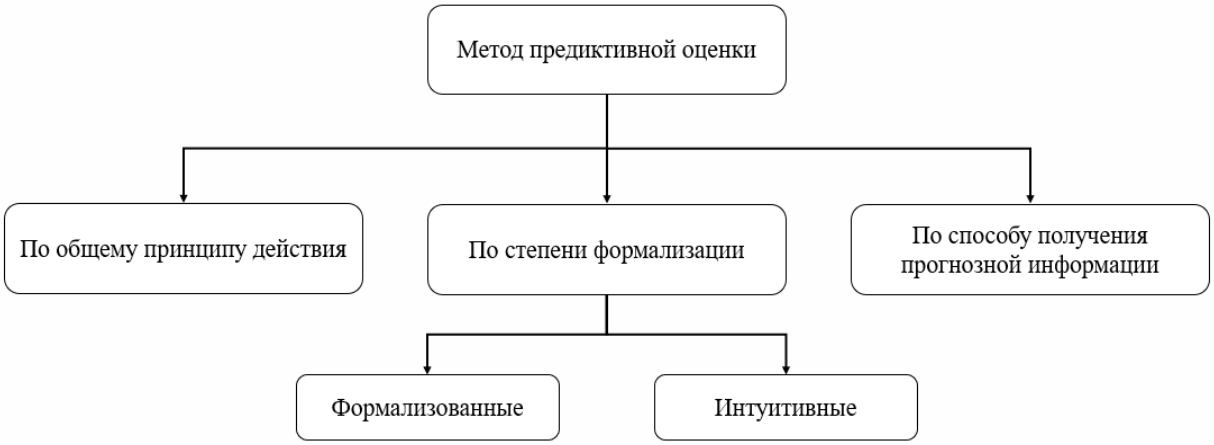


Рис. 1. Классификация методов предиктивной оценки

Применение методов на основе экспертных оценок к интенсивности энергопользования является достаточно спорным решением, поэтому чаще используются алгоритмы, где учитываются метеорологические факторы. Если игнорировать в расчетах данные показатели, это может привести к неверным выводам при разных погодных условиях.

Для оценки и сравнения эффективности моделей, используется специальный показатель – коэффициент детерминации

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y - X)^2}{\sum \left(Y - Y_{сред}\right)^2},$$

где Y – фактические значения зависимой переменной; X – модельные значения, построенные по оцененным параметрам.

Данный метод оценки энергопотребления – ситуативен и базируется на уже известных принципах и прогнозах по потреблению и выработке электроэнергии, он в большей части применим к частным домам или участкам. Он не будет работать в других отраслях из-за принципов устройства системы коммунального хозяйства, доступности различных видов энергии (например, природного газа в России), макроэкономических факторов и т. д.

С точки зрения дисперсионного анализа, модель можно представить в виде

$$R = \sum(a,b,c) + \sum(\varepsilon,\gamma,\alpha),$$

где R – наблюдаемое значение; a, b, c – параметры, описывающие определяемые эффекты; $\varepsilon,\gamma,\alpha$ – случайные величины, описывающие неопределяемые (остаточные) эффекты.

Таким образом, исходные величины могут быть разделены на две группы: неизвестные в процессе факторы, характеризующие особенности исследуемого сооружения, и факторы, характеризующиеся особенностями самих потребителей, которые можно рассчитать и учесть.

Формализованные методы, в основном представляют собой моделирование, основанное на математических теориях.

Прогнозная экстраполяция – метод научного исследования, который основан на распространении прошлых и настоящих тенденций, закономерностей, связей – на будущее развитие объекта прогнозирования [2].

К экстраполяции относятся следующие методы: метод наименьших квадратов, метод скользящей средней, метод экспоненциального сглаживания. Суть метода наименьших квадратов заключается в минимизации суммы квадратичных отклонений между реальными и прогнозируемыми значениями. Метод скользящей средней используют, когда возникают сильные колебания переменных по периодам, он не показывает определенных тенденций изменения. Чаще используется экспоненциальное сглаживание. Такой прием сглаживания заключается в вычислении скользящих средних, их использование помогает снизить периодические и случайные колебания и, таким образом, определить имеющуюся тенденцию в исследуемом динамическом ряду, это избавляет процесс от случайных колебаний. Использование данного метода дает возможность получить оценку параметров сложившейся тенденции к моменту последнего наблюдения.

В основе методов прогнозной экстраполяции лежит представление временного ряда в следующем виде

$$y_t = f(t) + S + C + \varepsilon_t,$$

где $f(t)$ – некоторая неслучайная функция времени; ε_t – стохастическая величина; S – сезонная составляющая; C – циклическая составляющая.

Построение модели множественной регрессии с применением метода наименьших квадратов является наиболее распространенным вариантом прогнозирования электропотребления. Посредством применения корреляционного анализа, с помощью парных коэффициентов, которые характеризуют связь двух выбранных переменных относительно остальных показателей, находят статистические значимые связи между переменными и оценивают, насколько они сильны.

Рассмотрим вариант регрессионного анализа с помощью линейной регрессии. Предположим, что есть некий дискретный внешний фактор, влияющий на процесс исследования. При этом связь между процессом и внешним фактором линейна, но на практике на процесс исследования воздействует целый ряд дискретных внешних факторов множественной модели. Недостатком является то, что для вычисления процесса исследования необходимо знать последующие значения всех факторов, что на практике почти невыполнимо.

Проблема прогнозирования традиционными методами заключается в необходимости учитывать огромное количество факторов, имеющих влияние на отклонение значений реальных данных энергопотребления от прогнозируемых. Для решения этих недостатков используются методы, основанные на машинном обучении, в частности, применение искусственных нейронных сетей (ИНС).

Преимущества использования ИНС заключаются в том, что они способны быстро обрабатывать большие массивы данных, адаптироваться в условиях изменчивой информационной среды с помощью процесса обучения, с высокой точностью определять последующие изменения в динамике систем, к которым они привязаны [3].

Искусственные нейронные сети базируются на разных архитектурах, однако при обработке данных используется один и тот же принцип. Главным преимуществом и основой работы нейронной сети является процесс самообучения, при котором в начале подается массив исходных данных, который может состоять из данных потребления электроэнергии в определенных погодных условиях, от времени суток, времени года и т. п. Результаты расчета на выходе нейрона сравниваются с выходными значениями массива данных.

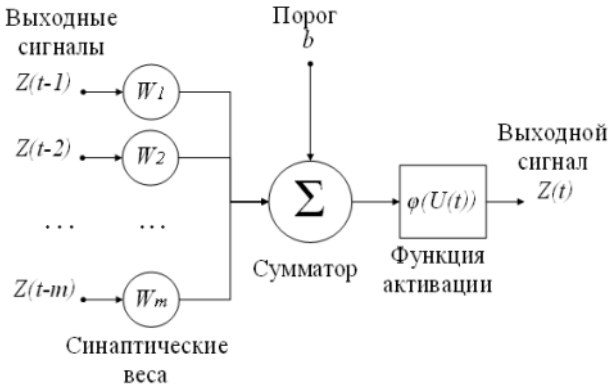


Рис. 2. Нелинейная модель нейрона

В представленной на рис. 2 модели нейрона изображены следующие процессы:

– синапсы (набор связей), каждый из которых обладает своим весовым коэффициентом. Сигнал Z_j на входе синапса умножается на вес W_{mj}, где m – связанный с ним нейрон;

– сумматор, учитывая пороговую функцию b_k, которая показывает уменьшение или увеличение сигнала на входе, осуществляет сложение входных сигналов, которые взвешиваются относительно весовых коэффициентов нейрона;

– функция активации предназначена для ограничения амплитуды входного сигнала нейрона.

Математическое представление модели нейрона

$$u_k = \sum_{j=1}^{m} \omega_{kj} x_{kj}, \quad y_k = \varphi(u_k + b_k),$$

где x_m – входные сигналы; ω_{km} – веса нейрона k; u_k – комбинация входных воздействий; b_k – порог; $\varphi(u_k + b_k)$ – функция активации; y_k – выходной сигнал нейрона.

Часть исходных данных может быть представлена в численном виде, а часть в категориальном (тип дня, время года и т. п.). При этом функция влияния входного параметра на выходной результат может быть какой угодно сложной (нелинейной, нестационарной). Возможно и неявное представление входных данных. Например, создание сети из нескольких ИНС, каждая из которых обучена на определении отдельного типа данных (например, определенного типа дня или времени года). Общий вход сети ИНС будет служить для отправки данных на отдельные предназначенные для

них ИНС. При этом фильтрация будет осуществляться по специальному, неявно заданному набору параметров (например, время года).

Нейронные сети активно используются при эксплуатации электроэнергетических систем: для анализа и предупреждения аварийных ситуаций, восстановления стабильного режима работы системы, поиска причин и определения последствий аварийных ситуаций, а также в эксплуатации для прогнозирования энергопотребления и оптимизации распределения нагрузки электростанции в целом.

Использование алгоритмов на базе нейронных сетей влечет за собой и ряд недостатков в процессе самообучения, если алгоритм построен неверно, а на вход подается некорректная обучающая последовательность или ошибочные входные параметры. В этом случае появляется возможность возникновения тупиковых ситуаций в расчетах, то есть неправильное построение закономерности в изменениях данных. Для правильного построения процесса самообучения ИНС требуется большой объем данных и специальное программное обеспечение, а также вычислительное оборудование высокой мощности для реализация крупных интегральных схем, что влечет за собой крупные финансовые затраты.

Выбор подходящей модели зависит от поставленной задачи, также необходимо учитывать тип исходных данных для обучения и их объем. Существует множество видов нейронных сетей, но для решения типичных задач прогнозирования потребления электроэнергии чаще всего применяется многослойный персептрон или сети Кохонена.

Список источников

1. *Бершадский И. А.* Использование искусственного интеллекта для прогнозирования электропотребления энергосбытовой компании. Донецк, 2020. С. 7–16.

2. *Билалова А. И.* Прогнозирование потребления электрической энергии электротехническим комплексом городской электрической сети. Ульяновск, 2019. С.21–23.

3. Цифровая система предиктивного анализа работы генерирующего оборудования. URL: https: // energypolicy.ru/czifrovaya-sistema-prediktivnogo-anal/ (дата обращения: 12.12.2022).

УДК 621.3 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-326-330**

Ю. П. Кузьменко*
студент
В. В. Романенко*
студент
Д. П. Бобрышов*
студент
В. П. Кузьменко*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЕНСАЦИИ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ

Рассматриваются способы компенсации емкостных токов в электрических сетях с изолированной нейтралью при помощи ступенчатого дугогасящего реактора и с применением резистивно-заземленной нейтрали. Рассмотрено само понятие емкостного тока.
Ключевые слова: *емкостной ток, режим работы нейтрали, замыкание, дугогасящий ректор, резистивная нейтраль, кабельные линии.*

Y. P. Kuzmenko*
Student
V. V. Romanenko*
Student
D. P. Bobryshov*
Student
V. P. Kuzmenko
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

RESEARCH OF CAPACITIVE CURRENT COMPENSATION TECHNOLOGY

The article discusses ways to compensate for capacitive currents in electrical networks with an isolated neutral using a step-by-step arc-extinguishing reactor and using a resistively grounded neutral. The very concept of capacitive current is considered.
Keywords: *capacitive current, neutral operating mode, short circuit, arc-extinguishing reactor, resistive neutral, cable lines.*

Введение

Качество и эффективность работы основных производственных потребителей в значительной мере зависит от надежности электроснабжения.

Согласно статистике большинство случаев повреждения различного электрооборудования, приходится на кабельные линии [1]. Так как существует множество причин повреждения кабельных линий, например, заводской брак, старение изоляции, человеческий фактор при проведении различных работ, также существенным фактором являются перегрузки сети в определенные периоды. Достаточное количество наблюдений, проведенных на тему повреждаемости кабельных линий [2], дает возможность сделать вывод о повторяемости повреждений с некоторой цикличностью. Это объясняется колебаниями природных условий при различных временах года. Из вышеперечисленного следует, что наиболее уязвимой категорией при перерывах в электроснабжении являются городские сети, поскольку большинство линий там именно кабельные. Это подтверждается статистическими данными по повреждаемости основных элементов электросети, которые приведены в табл. 1.

Большинство отключений на кабельных и воздушных линиях 6–35 кВ, которые работают в режиме изолированной нейтрали, происходит из-за замыканий одной из фаз на землю [3]. Так как линия электропередач является в том числе и емкостью, то во время развития замыкания создаются токи, обусловленные наличием данной емкости, наибольшее влияние на величину

Таблица 1

Данные по повреждаемости элементов электросети города

Эл-ты городской сети	Средняя повреждаемость	Длительность перерыва электроснабжения, ч	
		Внезапный	Плановый
Кабельные линии, км/год			
10 кВ	0,045	10	6
6 кВ	0,033	10	6
1 кВ	0,15	10	6
Воздушные линии, км/год			
6–10 кВ	0,2	2,5	12
1 кВ	0,29	2,5	6
Трансформаторы 6–10 кВ, трансформатор/год			
Воздушных сетей	0,02	10	8
Кабельных сетей	0,001	6	8
В целом (кабельных сетей)			
ТП	0,001	4	8
РП	0,015	6	12

емкостного тока оказывают кабельные линии, но при этом емкость большего количества других элементов, таких как трансформаторы, двигатели, выключатели и другие коммутационные аппараты, может быть сопоставима с емкостью всей линии, но при этом в способах оценки которые используются в настоящее время отсутствует оценка о вкладе этих емкостей в общее значение емкостного тока. В таком случае имеет место занижение фактического значения емкостного тока, что приводит к неправильному выбору компенсирующих устройств, следовательно, к недокомпенсации тока и резонансным перенапряжениям, возникающим в момент замыкания. Компенсация емкостных токов является важным аспектом при проектировании электрических сетей и соответственно должна учитываться при проведении технико-экономических расчетов.

Понятие емкостного тока

Само явление образования емкостного тока характерно в большей степени для линий, которые покрывают большие расстояния. В таком случае земля и сам проводник являются аналогами обкладок конденсатора, образуя некоторую емкость. В кабельных линиях на классе напряжения 6–10 кВ значение емкостного тока чаще всего укладывается в диапазон 7–10 ампер на километр протяженности линии, в случае же ненагруженной линии значение может составить более 50 ампер, тогда возможно образование дуги и, как следствие, возникают дуговые перенапряжения, которые разрушают неповрежденные фазы и, как следствие, однофазное замыкание превращается в межфазное с соответственным ухудшением ситуации. На текущий момент существует только один единый документ по компенсации емкостных токов, а именно ПУЭ, раздел 1, глава 1.2, пункт 1.2.16.

Дугогасящий реактор

Дугогасящий реактор (ДГР) предназначен для реализации защиты от замыканий. Реактор должен способствовать самогашению дуги, а также существенно снизить повреждения, возникающие на линии вследствие контакта одного из фазного проводника с землей. Конструкция ректоров похожа на масляный трансформатор, в котором находится магнитная система и обмотки. Магнитная система ДГР представляет собой катушку индуктивности с возможностью изменения величины индуктивности. При возникновении замыкания создается колебательный контур, в котором существует резонанс, данный контур происходит от двух составляющих: емкость проводника и индуктивности реактора. Следовательно, происходит компенсация емкостной составляющей тока, а амплитудное значение рабочего тока снижается до нормальных величин. Компенсация позволяет прервать горение дуги и снизить ток короткого замыкания. С точки зрения нормативно-правовой базы главным документом, регламентирующим ДГР, является РД 34.20.179.

На рис. 1 приведена осциллограмма металлического замыкания в сети 10 кВ ПС № 94 Магнитогорского металлургического комбината со ступенчатым дугогасящим реактором РЗДСОМ-380/10кВ. Из осциллограммы можно сделать вывод о том, что ток компенсации ДГР со ступенчатым регулированием принимает установившееся значение практически через два периода промышленной частоты [4].

Основными недостатками дугогасящего реактора является высокая цена, обусловленная сложностью устройства, но что важнее, емкость сети не является постоянной величиной, которая может изменяться под воздействием различных факторов, а из-за отсутствия в большинстве ДГР автоматического изменение индуктивности, может возникать недокомпенсация, как следствие падение эффективности гашения дуги.

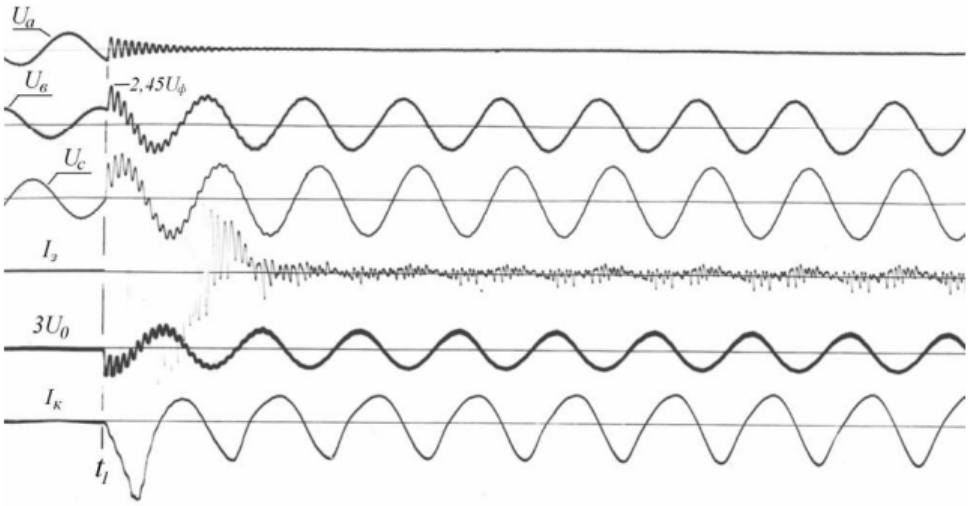


Рис. 1. Возникновение ОЗЗ в сети 10 кВ ПС №94 ММК с дугогасящим реактором РЗДСОМ-380/10кВ

Резистивно-заземленная нейтраль

Резистивно-заземленная нейтраль (рис. 2) – это способ заземления нейтрали, предполагающий присоединение нейтрали к заземляющему устройству через резистор с некоторым активным сопротивлением. Для организации такого режима работы нейтрали используются резисторы с большим сопротивлением, соответственно, это высокоомный режим, если используется резистор с низким сопротивлением, это низкоомный режим.

К основным достоинствам высокоомного заземления нейтрали можно отнести, то, что сеть способна работать при возникновении однофазного замыкания, как и в случае с изолированной нейтралью. Применение резистора с большим сопротивлением позволяет практически исключить возникновение феррорезонансных процессов в сети, а также возникновение дуговых перемежающихся коротких замыканий. В таком режиме с некоторой вероятностью возможно самогашение дуги в некотором диапазоне значений тока короткого замыкания в месте повреждения.

К недостаткам такого решения можно отнести значительное увеличение тока КЗ в месте повреждения примерно на треть. При таком режиме работы сети существует опасность возникновения прерывистых дуговых замыканий, происходят перенапряжения до 2,5-кратной величины относительно номинального напряжения фазы, это может приводить ко вторичным пробоям в местах с ослабленной изоляцией. Также необходимо учесть большую мощность резистора и проблемы с обеспечением его термической стойкости при устойчивых замыканиях [5].

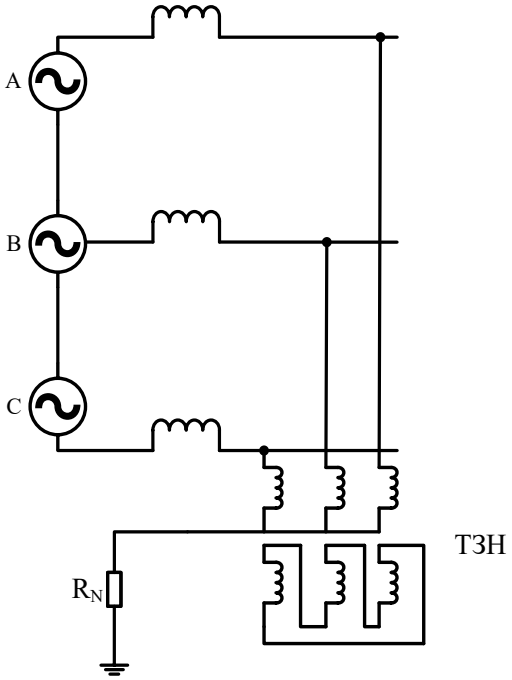


Рис. 2. Резистивно-заземленная нейтраль

При низкоомном заземлении нейтрали основным достоинством будет практически полное исключение возможности развития ситуации и переход однофазного замыкания в межфазное. В отличие от высокоомного заземления нейтрали, исключается возможность возникновения дуговых прерывистых замыканий, также в такой сети уменьшается значение шагового напряжения, что позволяет снизить вероятность поражения электрическим током людей и животных.

Основным недостатком является невозможность работы сети с замыканием, что является

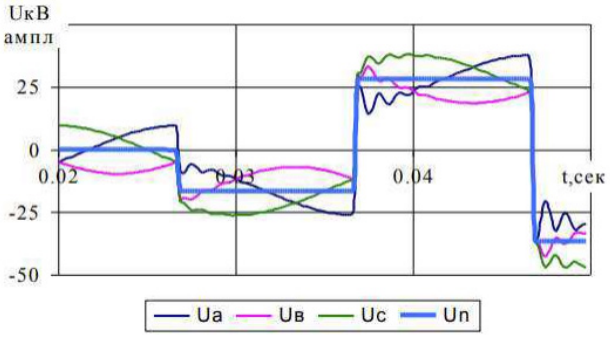


Рис. 3. Переходный процесс при дуговом замыкании в сети 10 кВ с изолированной нейтралью

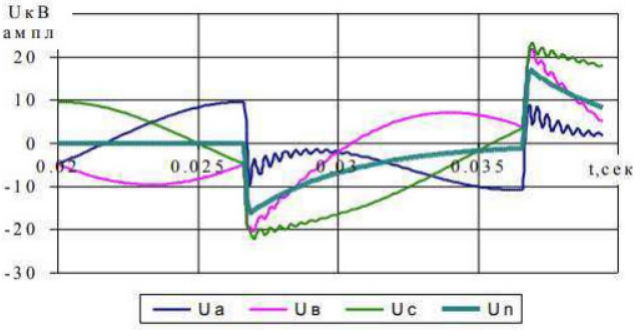


Рис. 4. Переходный процесс при дуговом замыкании в сети 10 кВ с высокоомным заземлением нейтрали

основной причиной внедрения изолированной нейтрали, соответственно, к сети использующий данный способ защиты предъявляются большие требования к техническому резервированию. Также важно отметить, что недостатком такого режим работы является увеличение числа отключений из-за кратковременных и самоустраняющихся пробоев изоляции.

На рис. 3 и 4 представлены графики переходных процессов в сети при возникновении однофазного замыкания, с нейтралью заземленной через высокоомный резистор, как видно из графика применение данного метода защиты позволило снизить перенапряжения в 1,7 раза [6].

Выводы

В целом рассматривая все меры, принимаемые в данный момент для компенсации емкостных токов, то можно сделать вывод только о частичном решении проблемы, но определенный аспект проблемы возможно решить, даже не доводя до возникновения аварийной ситуации.

К примеру, большинство функционирующих воздушных линий в РФ до сих пор на неизолированном кабеле, а большинство аварийных ситуаций, возникающих на воздушных линиях, происходят из-за падения ветвей деревьев на кабели, то есть тщательное отслеживание просеки и реконструкция линий под самонесущий изолированный провод (СИП), позволит избежать большинства аварийных ситуаций, возникающих на воздушных линиях.

Для кабельных же линий подход к решению проблемы должен быть комплексный. Помимо перечисленных в работе мер, в лице установке ДГР с плавным регулированием и перевод сети в режим работы с низкоомной нейтралью должны быть приняты меры как по установке систем регистрации токов высших гармоник, что позволит более точно определять место повреждения, так же необходима установка направленной токовой защиты, которая будет регистрировать направление тока, так как емкостные токи «стекают» в точку замыкания, то по положительному направлению мощности возможно определить именно то присоединение, которое находится на повреждении. Емкостной ток остальных присоединений будет иметь противоположное направление.

Комплекс данных средств позволит существенной снизить риск как возникновения аварийной ситуации, так и в случае ее возникновения не допустить дальнейшего ухудшения.

На текущий момент государству в лице профильных министерств и организаций необходимо провести работы с текущей нормативно-правовой базой, которой руководствуются при проектировании объектов энергетики, поскольку требуется более конкретно отразить требования к применению различных видов защит для предотвращения однофазных замыканий на землю. Также необходимо решить вопрос с организацией модернизации уже эксплуатируемых кабельных и воздушных линий, с целью дальнейшего снижения рисков возникновения нештатных ситуаций и повышения надежности снабжения конечных потребителей электроэнергией.

Список источников

1. *Кашеваров С. Г.* Повреждение линий электропередачи и обзор новых технических и организационных решений по их ограничению // Современное состояние и перспективы развития технических наук: сб. статей Междунар. научно-практ. конф. Уфа: РИО МЦИИ Омега Сайнс, 2015. С. 58.

2. *Невретдинов Ю. М., Фастий Г. П., Данилин А. Н.* Исследования опасности однофазных замыканий в сети 35 кВ Мурманского региона // Труды Кольского научного центра РАН. 2016. Вып. 12. С. 7–15.

3. *Андреев А. А.* Анализ существующих разновидностей защит от однофазных замыканий на землю и условия их применения // Вестник Самарского государственного технического университета. 2021. № 4. С. 56–70.

4. *Кричко В. А., Миронов И. А.* Опыт эксплуатации автоматических систем компенсации емкостного тока замыкания на землю. URL: http: //pnpbolid.com/wp-content/uploads/2019/10/iv-conference–2006–21.pdf (дата обращения: 13.01.2023).

5. *Евминов Л. И., Алферова Т. В.* Применение резистивного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кв // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. 2022. № 2. С. 53–67.

6. *Ильиных М. В., Дрожжина И. Л., Сарин Л. И.* Применение резистивного заземления нейтрали сети 35 кВ электроснабжения острова Ольхон. URL: http: //fenix88.com/documents/old/doc29_09_06/ilinih_droggina_sarin.pdf (дата обращения: 13.01.2023).

УДК 621.31 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-331-336**

А. В. Куликовская*
ассистент
О. Я. Солёная*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Рассматриваются факторы, влияющие на нарушение устойчивости электроэнергетических систем и качество электрической энергии, а также проводится моделирование режимов работы электрической сети 220/110/10/6 кВ.
Ключевые слова: *электроэнергетическая система, надежность, показатели качества электроэнергии, режимы работы электроэнергетических систем, моделирование аварийных режимов работы.*

A. V. Kulikovskaya*
Assistant
O. Ya. Solenaya*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

SIMULATION OF OPERATING MODES OF THE ELECTRICAL NETWORK

The article considers the factors affecting the instability of electric power systems and the quality of electric energy, and also simulates the operating modes of the 220/110/10/6 kV electric network.
Keywords: *electric power system, reliability, electricity quality indicators, operating modes of electric power systems, modeling of emergency operating modes.*

Периодически при эксплуатации систем электроснабжения (СЭС) возникают ненормальные режимы из-за перегрузки оборудования или внешних коротких замыканий (КЗ), происходящих в других элементах. Известны средства и меры, с помощью которых обеспечивается высокая степень надежности современных электроэнергетических систем (ЭЭС). Эти средства включают резервирование, использование селективной релейной защиты, которая действует при перегрузках или коротких замыканиях в защищаемых элементах сети. Надежная работа средств защиты препятствует развитию аварии [1]. Устройства автоматики преимущественно используются для восстановления питания потребителей при возникновении нарушения нормального режима работы сети. Необходимо согласовывать действия защиты с работой автоматических устройств, а также работу этих устройств, используемых на разных ступенях напряжения. Наиболее важные и часто встречающиеся автоматические устройства защиты – автоматическое повторное включение (АПВ) и автоматический ввод резерва (АВР) [2].

Шины распределительного пункта (РП) обычно состоят двух секций. Секционный выключатель Q3 отключен при нормальном режиме работы. С определенной секцией связана каждая отходящая от шин линия электроснабжения потребителей. При отключении релейной защиты или повреждении одной из питающих РП линий электроснабжение потребителей соответствующей секции прекращается. Электроснабжение может быть восстановлено включением секционного выключателя Q3 устройством автоматического включения резерва. Система АВР позволяет в аварийных режимах перестраивать структуру сети для того, чтобы не обесточивались потребители, питающиеся от соответствующей секции шин (рис. 1).

АПВ используется для быстрого автоматического восстановления питания после самоликвидации кратковременных коротких замыканий в ЛЭП и других элементах сети. Устройства АПВ бывают одно-, двух- и многократного действия. Чаще всего применяют АПВ на ЛЭП свыше 1 кВ.

На основе опыта эксплуатации воздушных линий электропередачи можно сделать вывод,

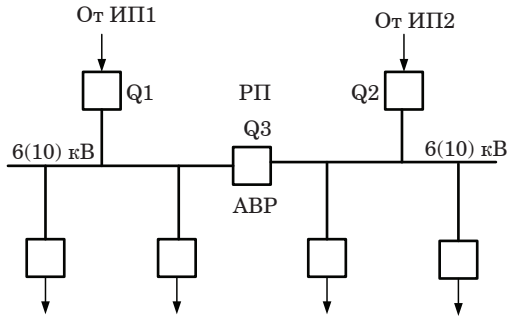


Рис. 1. Схема повышения надежности электроснабжения с помощью АВР

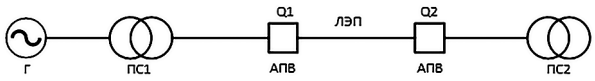


Рис. 2. Схема повышения надежности электроснабжения с помощью АПВ

что основная часть повреждений после быстрого отключения линий релейной защиты самоустраняется. Линия, включенная заново, остается в работе, обеспечивая последующее электроснабжение. Повторное включения осуществляется устройством автоматического повторного включения (рис. 2). Система автоматического повторного включения позволяет восстановить электроснабжение потребителя в том случае, если он будет ложно или неселективно отключен релейной защитой. При помощи АПВ восстанавливается электроснабжение в 50–60 % от общего числа аварийных отключений воздушных линий [3].

В случае если один из элементов системы поврежден и отключен, появляются проблемы в работе всей системы. Часто к недопустимым повышениям действующего напряжения и повышениям частоты приводит отключение части потребителей. Это может привести к дефициту электроэнергии (при отключении мощного генератора), выходу генераторов из синхронного режима, снижению действующего значения напряжения, частоты и нарушению устойчивости работы энергосистемы.

Оперативный персонал не может предотвратить быстрое протекание нежелательных процессов, поэтому восстановление нормального режима происходит весьма медленно. Если все генераторы системы загружены активной мощностью полностью, то восстановить частоту можно только путем отключения части наименее ответственных потребителей с помощью устройства автоматической частотной разгрузки (УАЧР) [4].

Состояние ЭЭС в какой-либо момент времени называется режимом работы ЭЭС. Определение режима происходит составом включенных основных элементов и загрузкой ЭЭС. Параметры режима характеризуются значениями напряжений, токов и мощностей элементов.

Полное представление об эффективности функционирования системы электроснабжения дают оценки надежности, экономичности и безопасности в нормальных условиях эксплуатации.

Основную часть времени ЭЭС работает в нормальном установившемся режиме, но и в ней могут возникать аварийные режимы. Рассмотрим аварийный режим по причине короткого замыкания.

Наиболее часто встречаемые виды КЗ в распределительных электрических сетях:

– однофазные;
– двухфазные;
– трехфазные;
– двухфазные на землю.

В большинстве случаев причинами коротких замыканий в электроэнергетической системе служат нарушения изоляции элементов оборудования и токоведущих частей. Когда в трехфазной сети происходит короткое замыкание возникает асимметрия напряжений. Она нарушает нормальное электроснабжение сети [5].

В ходе исследования коротких замыканий было обнаружено, что в большинстве случаев они протекают через переходное сопротивление. Таким сопротивлением является сопротивление электрической дуги, которая возникает в месте повреждения изоляции. Короткие замыкания без переходного сопротивления называются металлическими.

Смоделируем режимы работы электрической сети в специальном программном обеспечении. В качестве объекта исследования для дальнейшего моделирования была выбрана схема электрической сети, которая обеспечивает электроэнергией крупные потребительские подстанции промышленных и сельскохозяйственных потребителей напряжением 220 и 110 кВ (рис. 3). Эта схема делится на внешнюю и внутреннюю сети. Система внешнего электроснабжения предназначена для подвода электроэнергии от источника питания до узловой подстанции района. Данный участок сети представляет собой магистраль из двух параллельно идущих одноцепных ЛЭП на железобетонных опорах. Длина участка внешней системы энергообеспечения с учетом коэффициента неравномерности трассы равна 59,37 км. Проведя простые математические расчеты приходим к выводу, что для участка от источника питания до узловой подстанции потребуется установка от 170 до 230 промежуточных опор в зависимости от условий и специфики географического положения рас-

сматриваемого района. Также необходимо установить четыре концевые опоры, по две в начале и конце линий. По экономической плотности и току для питания системы внешнего электроснабжения был выбран провод марки АС-240/32 как оптимальный [6].

Электроэнергия в проектируемый район поступает на узловую подстанцию А. Эта подстанция имеет три уровня напряжения 220, 110 и 10 кВ и является понизительно-распределительной. На ней установлены два автотрансформатора типа АТДЦТН-125000/220/110/6. На ОРУ 220 кВ принята схема мостика с выключателем в перемычке и отделителями в цепях трансформаторов с ремонтной перемычкой. На ОРУ 110 кВ применена схема две рабочих системы шин с обходной [2].

Преимущество схемы с обходной системой шин состоит в распределении нагрузки по всем шинам, что в свою очередь повышает надежность. Открытое распределительное устройство служит для распределения энергии по системе внутреннего энергоснабжения. Система автоматического повторного включения предназначена для быстрого восстановления питания потребителей при неустойчивых коротких замыканиях, а значит уменьшает или не допускает ущерб, наносимый потребителям. Причинами неустойчивых коротких замыканий на воздушных линиях могут быть гроза, ветер, вызывающий схлестывание проводов, замыкания ветвями, птицами и др. случайные причины [7].

Система внутреннего электроснабжения выполнена на напряжении 110 кВ и состоит из кратчайшей схемы сети, которая питает потребительскую ПС Б, и радиально-магистральной схемы, по которым питаются ПС В, Г и Д. Потребительские подстанции по первичной схеме используют схему с одной рабочей и одной обходной системами шин с отделителями в цепях трансформаторов с совмещенным секционным и обходным выключателем.

В сети приняты двухобмоточные трансформаторы типа ТДН-16000/110/10 (ПС Д), ТДН-32000/110/10 (ПС Г), ТДН-16000/110/6,3 (ПС В), ТДН-32000/110/6,3 (ПС Б).

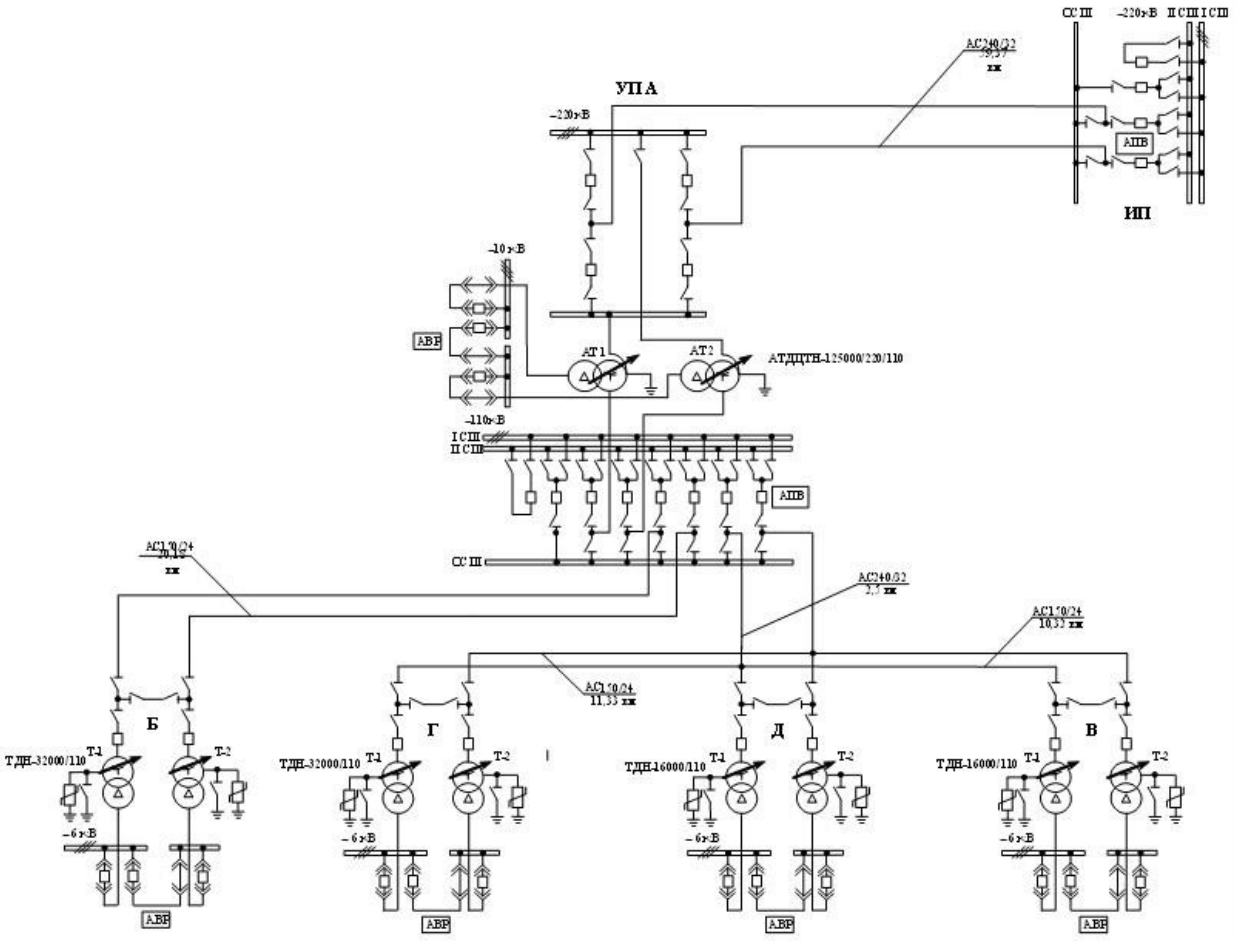


Рис. 3. Принципиальная схема электрической сети

Электроснабжение потребителей осуществляется непосредственно от шин 6 и 10 кВ, питание на которые поступает со стороны НН силовых трансформаторов. На каждой подстанции установлено по два силовых трансформатора. На стороне НН потребительских подстанций применена схема секционированной системы шин. По режиму работы нейтрали трансформаторы ПС с высшим напряжением 220 кВ работают с глухозаземленной нейтралью, 110 кВ – с эффективно заземленной нейтралью. Для повышения надежности и бесперебойности питания потребителей проектируемого района система оборудуется устройствами автоматики [50]:

– устройства автоматического повторного включения;

– устройства автоматического ввода резерва.

Проведем расчет установившегося режима работы ЭЭС в специализированном ПО PowerFactory, зададим параметры каждого оборудования, исходя из принципиальной схемы электрической сети (рис. 4) [8].

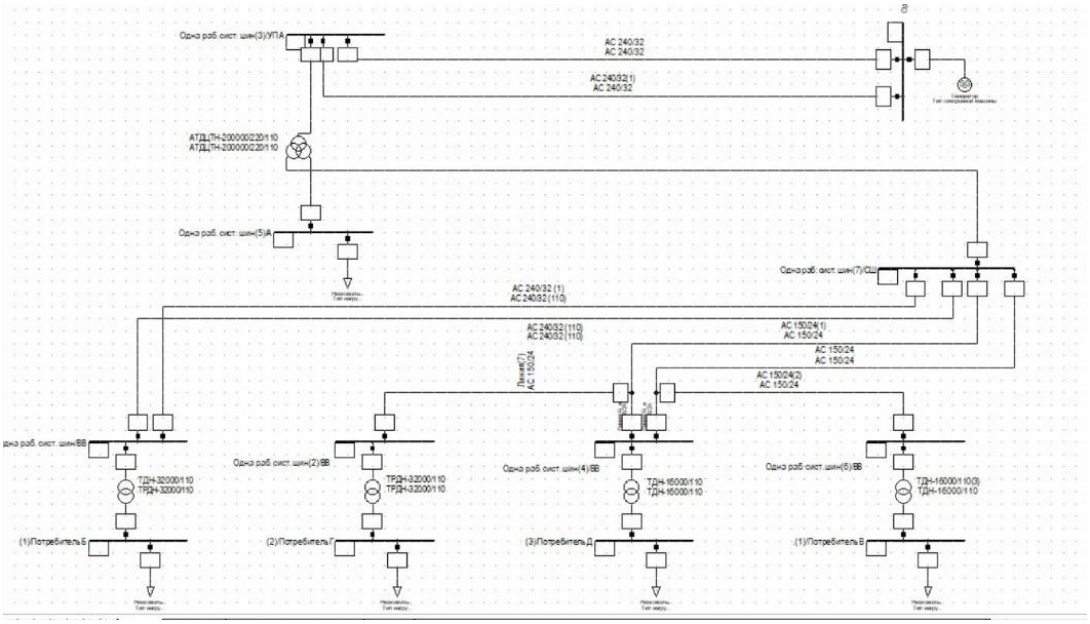


Рис. 4. Расчетная схема электрической сети

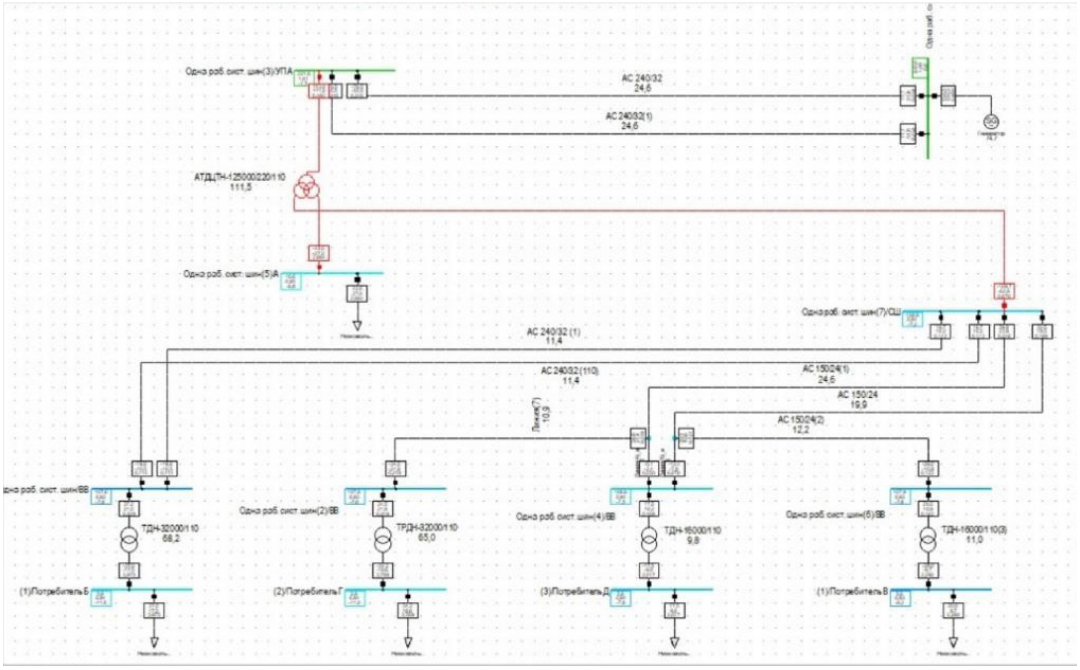


Рис. 5. Расчетная схема электрической сети с результатами расчета установившегося режима

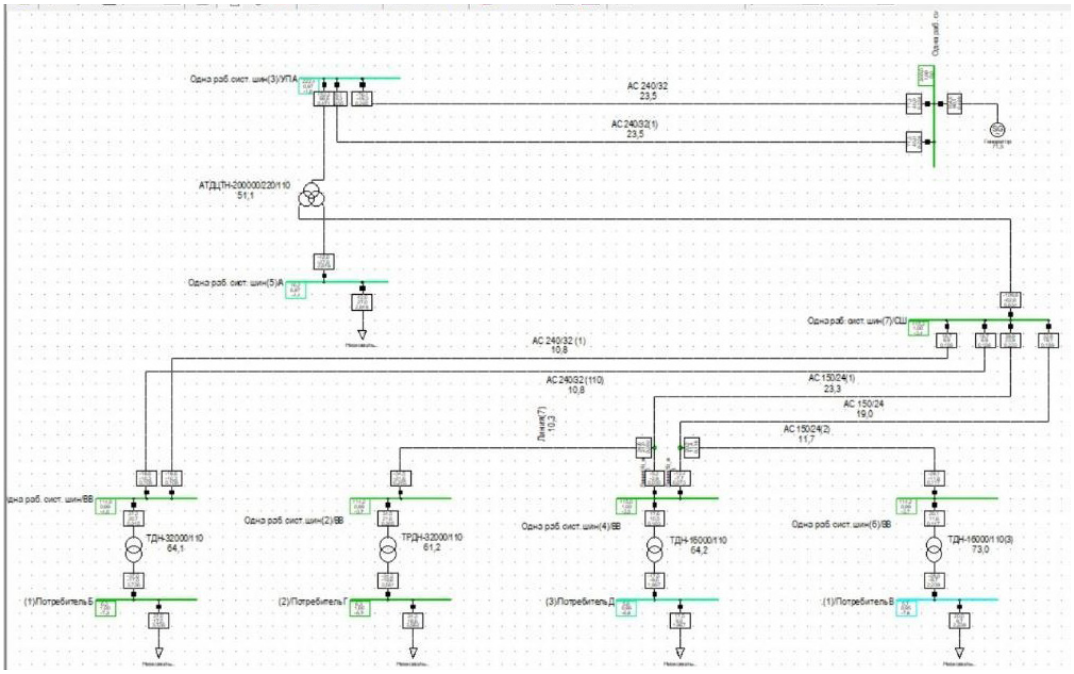


Рис. 6. Расчетная схема электрической сети с учетом замены трансформаторов и результатами расчета установившегося режима

Данные для всех типов оборудования введены. Выполняем расчет установившегося режима электроэнергетической системы (рис. 5).

В результате моделирования было выявлено, что автотрансформатор типа АТДЦТН-125000/220/110 перегружен, цвет линии красный, его загрузка составила 111,5 %, исходя их этого, мы можем видеть, что потребители всех подстанций являются недогруженными. Следовательно, необходимо рассмотреть возможность замены автотрансформатора на большую мощность. Для этого был выбран автотрансформатор большей мощности АТДЦТН-200000/220/110 (рис. 6) [9].

Как можно заметить, замена автотрансформатора привела к повышению напряжения на шинах потребителей А, Б, Г, Д, загруженность автотрансформатора стала в пределах нормы – 51,1 %.

Потребитель В все еще является недогруженным, выделен голубым цветом, напряжение составляет 5,7 кВ. По результатам расчета определяем отклонение напряжения на низкой стороне трансформаторной ПС В от желаемого в режиме максимальной нагрузки

$$U_{н.ж.} = 1{,}05 \cdot U_{н.сети.} = 1{,}05 \cdot 5{,}7 = 6кВ;$$

$$\delta U = \left| \frac{U_{\text{н.факт.}} - U_{\text{н.ж.}}}{U_{\text{н.ж.}}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{5{,}7 - 6}{6} \right| \cdot 100\% = 5\%.$$

В послеаварийных режимах допускается дополнительное понижение напряжения на 5 % к указанным величинам [10].

Отклонение напряжения сравниваются с половиной ступени регулирования напряжения на трансформаторах, величина которой составляет в сетях 110 кВ – 1,78 %, а 220 кВ – 5 %

$$\delta U_{110} = \frac{1{,}78}{2} = 0{,}89\%, \quad \delta U_{220} = \frac{5}{2} = 2{,}5\%.$$

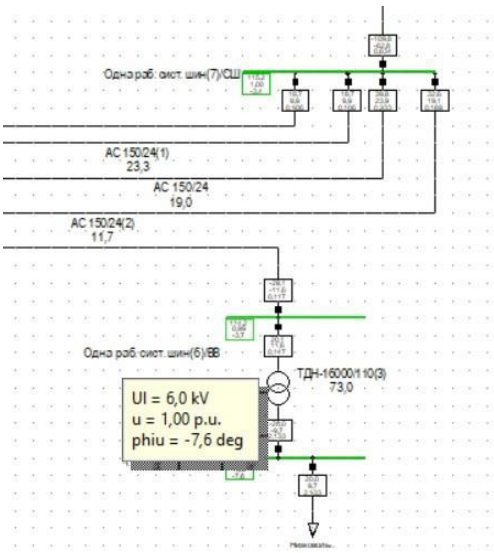


Рис. 7. Подстанция В с учетом корректировки напряжения с помощью устройства РПН

Исходя их расчетов отклонение напряжения превышает допустимое значение. Постараемся его скорректировать с помощью применения устройства РПН на питающих трансформаторах.

С помощью РПН нам удалось скорректировать напряжение с 5,7 до 6 кВ при моделировании режимов работы СЭС в ПО DIgSILENT PowerFactory и цвет шины низкого напряжения стал зеленым, что соответствует желаемому уровню напряжения.

Исследование устойчивости электроэнергетических систем включает в себя анализ режимов работы ЭЭС систем в условиях до и после внезапных изменений нагрузки или генерации, во время повреждений и плановых отключений. Устойчивость энергосистемы определяется ее способностью сохранять стабильную работу в нормальных условиях, а также возвращаться к установившемуся режиму после возникновения различных возмущений. Поэтому необходимо проектировать и эксплуатировать ЭЭС таким образом, чтобы она смогла противостоять событиям, приводящим к возникновению аварийных ситуаций без сброса нагрузки. В соответствии с тремя возможными временными диапазонами, переходной процесс (ПП) в энергосистеме можно классифицировать следующим образом:

– кратковременные или электромагнитные ПП;

– средней длительности или электромеханические ПП;

– длительные ПП.

Переходные процессы, вопросы устойчивости и задачи управления являются важными при планировании, проектировании и функционировании современных энергосистем. Исследования, в которых рассматриваются электромагнитные переходные процессы и различные аспекты устойчивости, можно выполнить в специализированном ПО с помощью динамического моделирования для различных периодов времени, либо с помощью инструментария анализа статической и динамической устойчивости.

Список источников

1. *Беляева А. В., Солёная О. Я.* Анализ нормативной базы по показателям качества электроэнергии // Сб. докл. конф. Завалишинские чтения'18, 17–20 апреля 2019. СПб.: ГУАП, 2019. С. 14–18.

2. *Скопинцев В. А., Чемоданов В. И., Чичинский М. И.* Оценка надежности работы электрической системы (Трактат)-энергетических систем. М., 2004. 40 с.

3. *Щербаков Е. Ф., Александров Д. С., Дубов А. Л.* Электроснабжение и энергопотребеление в сельском хозяйстве: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2020. 392 с.

4. *Васильева Т. Н.* Надежность электрооборудования и систем электроснабжения. М., 2015. 152 с.

5. *Шишлаков В. Ф., Солёная О. Я., Солёный С. В.* Основы электроснабжения объектов отрасли: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2017. 86 с.

6. *Беляева А. В.* Выбор оптимальной конфигурации и параметров системы электроснабжения промышленного района. СПб.: ГУАП, 2018. 62 с.

7. Правила устройства электроустановок. М.: Кнорус, 2014. 488 с.

8. Программа DIgSILENT PowerFactory: Официальный сайт. URL: http: //www.digsilent.de. (дата обращения: 18.01.2023).

9. *Беляева А. В., Солёная О. Я.* Влияние отказов оборудования на надежность систем электроснабжения // Сб. докл. конф. Завалишинские чтения'20. СПб.: ГУАП, 2020.

10. *Солёная О. Я., Лач С. Ю.* Моделирование аварийных режимов электроэнергетических систем // Сб. докл. конф. Завалишинские чтения'18. СПб.: ГУАП, 2018.

УДК 621.314.6 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-337-341**

А. А. Мартынов*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

К ВЫБОРУ ТИПА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГРЕБНЫХ ВИНТОВ АТОМНЫХ ЛЕДОКОЛОВ

Выполнена сравнительная оценка трех типов электроприводов гребных винтов ледоколов: асинхронного, синхронного с постоянными магнитами, выполненного по схеме вентильного двигателя и вентильно-индукторного. Сформулированы рекомендации по совершенствованию электроприводов гребных винтов большой мощности.
Ключевые слова: *электропривод, асинхронный, синхронный и вентильно-индукторный двигатель, гребной винт.*

A. A. Martynov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

TO THE CHOICE OF THE TYPE OF ELECTRIC DRIVE OF PROPELLERS OF NUCLEAR ICEBREAKERS

A comparative assessment of three types of electric drives of icebreaker propellers was carried out: asynchronous, synchronous with permanent magnets, made according to the scheme of a valve motor and valve-inductor. Recommendations for improving the electric drives of high-power propellers are formulated.
Keywords: *Electric drive, asynchronous, synchronous and valve-inductor motor, propeller.*

Введение

В настоящее время происходит бурный рост ледокольного флота как в России, так и во многих странах мира, включая такие страны как США, Канада, Норвегия и др. Неуклонно растет мощность электроприводов винтов ледоколов. Так, в России введены в эксплуатацию атомные ледоколы «Арктика» и «Урал». Каждый из этих ледоколов имеет по 3 винта мощностью по 20 МВт. Таким образом, суммарная мощность винтов каждого ледокола составляет 60 МВт. Оказалось, что это мощность не является пределом. В процессе строительства находится более мощный атомный ледокол «Лидер» с четырьмя винтами. Расчетная мощность электропривода каждого винта составляет 30 МВт, а суммарная мощность четырех винтов 120 МВт. Фотография макета атомного ледокола «Лидер» приведена на рис. 1. Очевидно, что существенное увеличение

Рис. 1. Фотография макета атомного ледокола «Лидер»

мощности гребных винтов требует повышенного внимания к выбору типа электропривода для атомных ледоколов.

Проведем краткую сравнительную оценку трех типов электроприводов гребных винтов: асинхронного, синхронного с постоянными магнитами, выполненного по схеме вентильного двигателя и вентильно-индукторного двигателя.

Сравнительная оценка трех типов электроприводов гребных винтов

Асинхронный электропривод

Достоинства:

– хорошо отработанная технология проектирования и изготовления асинхронных электродвигателей;

– простота управления и обслуживания электропривода;

– высокая надежность и безотказность в работе;

– хорошо отработанные схемотехнические решения надежных полупроводниковых преобразователей для этого типа ЭП.

Недостатки:

– наличие электрических потерь мощности в обмотке ротора;

– наличие реактивной составляющей в фазном токе двигателя, поэтому коэффициент мощности асинхронного двигателя всегда меньше 1.

Вентильный двигатель с магнитоэлектрическим возбуждением

Достоинства:

– отсутствие потерь мощности в роторе;

– коэффициент мощности синхронной машины может быть равен 1.

Недостатки:

– необходима быстродействующая токовая защита цепи обмотки якоря для разъединения силовой схемы преобразователя и обмотки якоря двигателя в случае возникновения короткого замыкания в цепи полупроводникового преобразователя. При коротком замыкании в силовой цепи полупроводникового преобразователя и при вращении ротора (по инерции), в обмотке якоря наводится ЭДС, под воздействием которой ток короткого замыкания достигает величины, приводящей к возникновению пожара и выходу двигателя из строя;

– возможно размагничивание постоянных магнитов индуктора двигателя, что ведет к полному выходу электропривода из строя;

– определенные сложности реализации процесса пуска двигателя в ход.

Сравнивая достоинства и недостатки асинхронного и вентильного двигателя с магнитоэлектрическим возбуждением, можно отметить, что асинхронный двигатель обладает более высокой надежностью, безотказностью в работе и меньшей стоимостью изготовления и обслуживания по сравнению с вентильным двигателем.

Вентильно-индукторный двигатель

Достоинства:

– малые потери в роторе;

– простота конструкции индукторной машины;

– высокий процент ремонтопригодности;

– относительно низкая себестоимость.

Недостатки:

– сложный пространственный характер меняющегося магнитного поля, особенно в зубцах сердечников статора и ротора, затрудняет выполнение аналитических расчетов параметров и характеристик вентильно-индукторных двигателей и снижает точность расчетов;

– затруднен расчет потоков «выпучивания» в торцевой зоне машины, наличие которых приводит к появлению дополнительных потерь и нагреву машины;

– сложность управления процессами в электроприводе для обеспечения требуемых характеристик;

– высокий уровень шумов и вибраций;

– число проводов, соединяющих преобразователь и машину, в два раза больше, чем в асинхронном или синхронном приводе при равенстве числа фаз двигателей;

– плохое использование стали (наличие значительных отходов при штамповке).

Отметим то общее, что объединяет эти приводы.

Из теории электрических машин [1] известно, что размеры электродвигателя связаны с электромагнитной мощностью соотношением

$$D^2 l = \frac{P_{эм} 60}{nkAB_{\delta\max}}, \qquad (1)$$

где $D^2 l$ – объем, ограниченный активной поверхностью якоря; $P_{эм}$ – электромагнитная мощность двигателя, Вт; A – линейная нагрузка, А/м; $B_{\delta\max}$ – индукция в зазоре, T; n – скорость вращения ротора, об/мин; k – коэффициент.

Для машин переменного тока

$$k = \pi^2 k_{об}/\sqrt{2}.$$

Поскольку $k_{об}$ машин переменного тока для первой гармоники в среднем близок к значению $k_{об} \approx 0{,}92$, то $k = 6{,}43$. Для машины постоянного тока $k = 6{,}5$. Это означает, что выражения, связывающие электромагнитную мощность с геометрическими размерами и электромагнитны-

ми загрузками для машин постоянного и переменного тока, не только одинаковы по форме, но и совпадают количественно. Следствием этого является общность принципиального подхода к определению геометрических размеров активной поверхности якоря D и l для машин переменного тока -асинхронных и синхронных как с активным ротором, так и индукторных.

Произведение $kAB_{\delta max}=K_э$ – принято называть коэффициентом использования Эссона, а величину обратную коэффициенту Эссона называют машинной постоянной Арнольда, C_A:

$$C_A = \frac{1}{K_Э} = \frac{1}{kAB_{\delta\max}} = \frac{nD^2l}{P_{эм}60}. \qquad (2)$$

Из приведенных соотношений видно, что чем больше коэффициент Эссона, тем меньше габариты машины при заданной мощности и скорости вращения. Для уменьшения размеров машины следует увеличивать значения линейной нагрузки A и максимальной индукции в зазоре $B_{\delta max}$. Однако индукция в зазоре любой электрической машины ограничена условиями насыщения ее магнитопровода, и в частности зубцовой зоны, непосредственно примыкающей к зазору. Длительный опыт проектирования электрических машин позволил установить предельно допустимые значения индукции в узком месте зубца магнитопровода, $B_{z\,max}$, T

– для асинхронных машин $B_{z\,max}$ – 2,0–2,2 T;

– для синхронных машин $B_{z\,max}$ – 2,0–2,2 T;

– для машин постоянного тока $B_{z\,max}$ – 1,8–2,0 T.

Установлены также и оптимальные предельные значения индукции в зазоре $B_{\delta.}$ в зависимости от мощности машины, величина которой пропорциональна квадрату диаметра якоря

$$P_{эм} = mEI = kAB_{\delta\max}D^2l\frac{n}{60}. \qquad (3)$$

Так, рекомендуемые значения индукции в зазоре для синхронных явнополюсных машин при 2p=8 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Рекомендуемые значения индукции в зазоре синхронной машины

D, мм	350	500	800	1200	1800	2000
B_δ, Т	0,715	0,745	0,775	0,800	0,820	0,840

Аналогичные рекомендации имеются и для других машин.

Линейная нагрузка также ограничена.

Таким образом, ограничения по индукции и линейной нагрузки не позволяют существенно уменьшить габариты машины при заданных значениях скорости вращения и электромагнитной мощности независимо от типа этой машины.

Современное состояние разработки электроприводов для гребных валов

Среди перечисленных трех типов электроприводов гребных винтов наибольшее применение на практике находит асинхронный электропривод. На рис. 2 приведена фотография гребного асинхронного электродвигателя для атомного ледокола Урал на мощность 20 МВт. Большинство электроприводов гребных винтов, разработанных ЦНИИ СЭТ, относится к асинхронным электроприводам. Выполнены разработки асинхронных ЭП мощностью 10 МВт и мощностью 20 МВт, например, асинхронный электропривод для ледокола проекта 4444 мощностью 20 МВт (2 × 10 МВт). Номинальная частота вращения винта 120 об/мин.

Краткий обзор состояния разработок ЭП для военно-морского флота, выполненных США, Францией, Великобританией и ФРГ показал, что США в 2008 году разработали для двух эсминцев типа Zumwalt 2 асинхронных электропривода мощностью по 36,5 МВт, работающих на два винта, рабочее напряжение 6600 В [3]. Находят применение и синхронные двигатели с магнитоэлектрическим возбуждением. Прорабатываются варианты выполнения синхронного двигателя с высокотемпературной сверхпроводимостью (ВТСП).

Так, на «третий эсминец типа Zumwalt в качестве гребного электродвигателя был принят

Рис. 2. Гребной асинхронный электродвигатель ледокола Урал

вариант высокотемпературного сверхпроводимого синхронного двигателя с постоянными магнитами мощностью 36,5 МВт, рабочим напряжением 6600 В с частотой вращения 120 об/мин» [3]. «AMSC и Northrop Grumman (NOC) в 2007 году объявили об успешном завершении испытаний крупнейшего в мире ВТСП судового электродвигателя мощностью 36,5 МВт. В проекте также участвовали Ranor Inc, и Electric Machinery Company. Масса электродвигателя составляет 75 т, что в три раза меньше, чем для двигателя традиционного исполнения. По завершению испытаний электродвигатель передали ВМФ США с вероятной установкой на новейший эсминец класса DDG-1000» [4].

«Полномасштабный прототип синхронного гребного ЭД с системой возбуждения на постоянных магнитах в составе экспериментальной установки IPS успешно прошел испытания в 2004 году. Двигатель мощностью 36,5 МВт с частотой вращения ротора 120 об/мин» [5].

«В 2003 году итальянская фирма Fincantieri и российское ЦКБ «Рубин» начали совместную разработку подводной лодки нового поколения для действий в прибрежной зоне. Гребной электродвигатель на постоянных магнитах, обеспечивающий мощность 1 МВт при 150 об/мин, приводит семилопастной малошумный винт» [3]. Попытки создать ВТСП судовой электропривод в России предпринимались ранее, но обнадеживающих результатов пока нет.

Рассмотрим состояние разработок гребных вентильно-индукторных электроприводов. Примеров практической реализации вентильно-индукторных электроприводов большой мощности на военно- морских судах США, Великобритании и Франции не обнаружено.

В [7] показано, что «…из анализа доступных источников информации можно сделать вывод, что в настоящее время только в России имеются внедренные разработки вентильно-индукторных электроприводов большой мощности (свыше 500 кВт)». В этой статье также указано, что «работы по созданию гребного низкооборотного индукторного двигателя мощностью 2 МВт с частотой вращения 200 об/мин ИД-2000-200 для системы электродвижения морского буксира начались в ЗАО «ИРИС» в 2008 году по заданию Центрального научно-исследовательского института судовой электротехники (ЦНИИ СЭТ в настоящее время филиал ФГУП «Крыловский государственный научный центр», г. Санкт-Петербург). Сборка двигателя была выполнена на предприятии ООО «ЛебГОК-ЭЭРЗ», г. Губкин Белгородской обл. в 2009 году. Испытания весной 2010 г. в Новочеркасске при 50 % нагрузке показали, что двигатель имеет достаточный резерв для обеспечения проектной мощности в 2 МВт при частоте вращения 200 об/мин». В настоящее время буксир успешно эксплуатируется без замечаний.

Замедление темпа разработок вентильно-индукторных двигателей большой мощности во всем мире на наш взгляд объясняется следующим. Среди перечисленных выше недостатков вентильно-индукторного двигателя основным недостатком следует считать отсутствие отработанной методики проектирования, обеспечивающей хорошую сходимость результатов расчетов с практикой. Дело в том, что существующие методики расчета не обеспечивают требуемой точности расчета и требуют «доводки» этих методик с учетом результатов испытаний экспериментального образца двигателя. Так, в [8] показано, что «**п**рименение метода Нелдера – Мида в практике проектирования ВИД позволило существенно увеличить среднее значение электромагнитного момента. Так, до оптимизации значение среднего электромагнитного момента было равно 7,4 Н·м, после оптимизации – 8,55 Н·м, что составило увеличение на 15,5 %».

Приведенный пример показывают насколько не точны рабочие методики расчета вентильно-индукторных двигателей.

Большое влияние на характеристики вентильно-индукторного двигателя оказывают параметры, точный учет которых при разработке методик проектирования вызывает определенные затруднения, например, влияние геометрических размеров зубцовой зоны на энергетические и динамические характеристики ВИД [6]. Оказывает влияние на величину пульсаций электромагнитного момента значение угла коммутации, при котором обмотка находится в закороченном состоянии и т. п. Методика расчета вентильно-индукторных двигателей требует существенной доработки для «создания дружественных программ совместного расчета магнитных явлений в ВИД и электрических процессов в их обмотках, питаемых от преобразователей» [9].

Таким образом, выполненный краткий обзор результатов разработки и внедрения на судах морского флота асинхронных, вентильных и вентильно-индукторных электроприводов с заданными характеристиками позволяет отдать предпочтение асинхронному электроприводу для привода гребных винтов повышенной мощности.

Очевидно, что такое же мнение сложилось и у американцев при выборе типа электрического привода для эсминца Zumwalt.

Рассмотрим два варианта выполнения мощного асинхронного электропривода для атомного ледокола:

– 2 × 15 МВт – два электродвигателя мощностью по 15 МВт с общим валом;

– 1 × 30 МВт – один электродвигатель мощностью 30 МВт.

Первый вариант выполнения электропривода имеет хорошо проработанный ЦНИИ СЭТ аналог – электропривод 2х10 МВт.

Каждый асинхронный двигатель электропривода 2 × 15 МВт необходимо выполнить с тремя трехфазными обмотками, каждая из которых выполняется на 5 МВт и запитывается от преобразователя частоты мощностью 5 МВт.

Успех в реализации этого варианта – очевиден, поскольку методика расчета многофазного двигателя отработана и проверена, а преобразователи частоты выполняются также по отработанной схеме.

Второй вариант проекта может быть реализован при выполнении электродвигателя мощностью 30 МВт с 18-фазной обмоткой. Этот вариант может быть выполнен по наработанной схеме – шесть трехфазных обмоток, каждая из которых выполняется на 5 МВт и запитывается от преобразователя частоты мощностью 5 МВт. Возможность и целесообразность выполнение асинхронного двигателя мощностью 30 МВт подтверждено американцами при строительстве двух эсминцев типа Zumwalt (см. выше).

В качестве дополнительного обоснования перспективности второго варианта выполнения асинхронного гребного электропривода можно указать на общность зависимостей геометрических размеров электрических машин от электромагнитной мощности $P_{эм}$. Это зависимость сформулирована Петровым Г. Н [2]: «*Геометрические размеры электрических машин с одинаковой скоростью вращения изменяются пропорционально корню четвертой степени из их мощности*

$$l \equiv \sqrt[4]{P_{эм}}. \qquad (4)$$

Если сравнивать суммарные вес G_N, стоимость C_N и потери $П_N$ для N одинаковых машин с соответствующими величинами G_1, C_1 и $П_1$ одной машины той же суммарной мощности $P_{эм}$, то

$$\frac{G_n}{G_1} = \frac{C_n}{C_1} = \frac{П_n}{П_1} = \frac{N\sqrt[4]{\frac{P_{эм}^3}{N^3}}}{\sqrt[4]{P_{эм}^3}} = \sqrt[4]{N}, \qquad (5)$$

то есть общий вес, стоимость и потери нескольких машин всегда больше веса, стоимости и потерь одной машины той же суммарной мощности.

Следовательно, при N=2 суммарный вес G_2, стоимость C_2 и потери $П_2$ двух машин мощностью по 15 МВт будут 1,189 раз выше, чем одной машины мощностью 30 МВт.

Заключение

Выполненный краткий обзор результатов разработки и внедрения на судах морского флота асинхронных, вентильных и вентильно-индукторных электроприводов с заданными характеристиками позволяет рекомендовать для атомных ледоколов, например, для ледокола «Лидер», асинхронный тип гребного электропривода с двигателем в одном корпусе.

Список источников

1. *Вольдек А. И.* Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 840 с.

2. *Петров Г. Н.* Электрические машины. Ч. I. М.; Л.: Госэнергоиздат. 1956. 224 с.

3. *Целуйко И. Г.* Развитие электродвижения военных флотов в мире // Молодой ученый. 2012. № 4. С. 54–57. URL https: //moluch.ru/archive/39/4563/ (дата обращения: 22.10.2018).

4. *Зингер М. А., Клементьева К. В., Захаров И. В.* Применение промышленных моторов с использованием высокотемпературной сверхпроводимости на морском флоте // Техника. Технологии. Инженерия. 2017. №1. С. 27–33. URL https: //moluch.ru/th/8/archive/46/1394/ (дата обращения: 28.10.2018).

5. Перспективы развития энергетических установок надводных кораблей ВМС зарубежных стран // Зарубежное военное обозрение. 2007. № 3. С. 58–61.

6. *Глушко В. Н., Алферова Т. В., Бахур С. И.* Моделирование вентильно-индукторных двигателей // Экономика и управление народным хозяйством. С. 1–11.

7. *Птах Г. К.* Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт // Russian Internet Journal of Electrical Engineering. 2015. Vol. 2.

8. *Петрушин А. Д., Шевкунова А. В., Кашуба А. В.* Оптимизация активной части вентильно-индукторного двигателя методом Нелдера – Мида // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 6. С. 83–92.

9. *Кузнецов В. А.* Некоторые особенности разработки и применения вентильно-индукторных машин // Вентильно-индукторный электропривод: доклады научно-практ. семинара. М.: МЭИ, 2006. 112 с.

УДК 658.513 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-342-345**

М. С. Романова*
ассистент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

Выполнено построение математической модели жизненного цикла.
Ключевые слова: *жизненный цикл, автоматизированная система, продукт электротехники.*

M. S. Romanova*
Assistant
**St. Petersburg state University of aerospace instrumentation*

MATHEMATICAL MODEL OF THE LIFE CYCLE OF ELECTRICAL PRODUCTS

The construction of a mathematical model of the life cycle has been completed.
Keywords: *life cycle, automated system, product of electrical engineering.*

Актуальной темой для исследования жизненного цикла наукоемкого оборудования является изучение возможностей сокращения времени жизненного цикла, за счет объединения нескольких этапов в один или удаление их, без ущерба для показателей надежности и качества выпускаемой продукции.

Оценить стандартный подход в определении жизненного цикла (ЖЦ) и сравнить его с предложенным можно использую математическое моделирование.

Построение математической модели двух подходов ЖЦ позволит оценить время каждого этапа и сравнить его со временем, затраченным при автоматизированном управлении. Исследовать возможности сокращения времени непроизводительных этапов жизненного цикла объекта электротехники: выбор комплектующих технического решения, проектирование, экспертиза, внедрение, модернизация, демонтаж, разборка и утилизация. Иными словами, исследовать технические и технологические возможности того, чтобы только время эксплуатации с учетом планового ремонта и замены (модернизации) были дольше [1].

Наибольшую практическую ценность в оценке ЖЦ играет оценка такого параметра, как длительность, то есть времени, затраченного на каждый отдельный этап, и оценка всего жизненного цикла изделия.

Рассмотрим, как оценить продолжительность жизненного цикла на основе анализа ин-

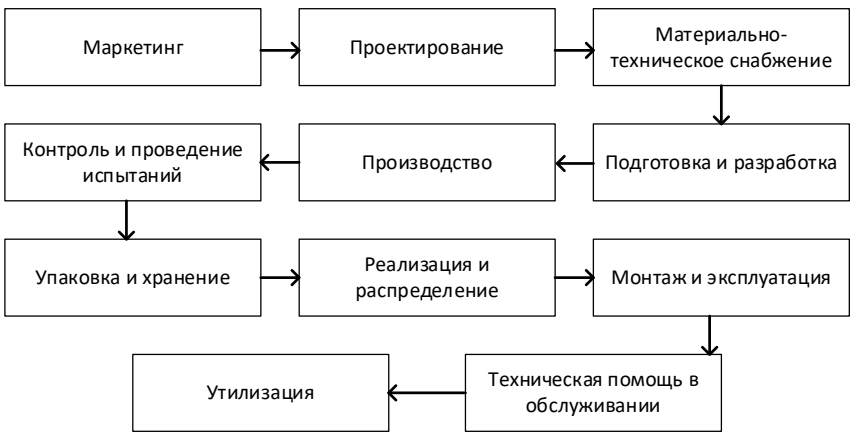


Рис. 1. Классическая последовательность жизненного цикла наукоемкого оборудования

Таблица 1

Содержание этапов ЖЦ

Этапы	Содержание
Этап 1. Маркетинг	Изучение рынка, выявление сильных и слабых сторон, востребованность в продукте
Этап 2. Проектирование	Разработка конструктивных чертежей
Этап 3. Материально-техническое снабжение	Приобретение необходимых составляющие для обмоток и сердечника
Этап 4. Подготовка и разработка	Выбор заготовки осуществляется исходя из назначения и конструкции детали, материала, технических требований, масштаба и серийности выпуска, а также экономичности изготовления
Этап 5. Производство	Последовательность сборки в основном определяется конструкцией изделия, компоновкой деталей и методами достижения требуемой точности и может быть представлена в виде технологической схемы сборки
Этап 6. Контроль и проведение испытаний	Испытания, проводимые по ГОСТ и СНиП. Выявление неисправностей в конструкции и предложение путей решения проблемы
Этап 7. Упаковка и хранение	Маркировка готовой продукции и хранение ее на складе
Этап 8. Реализация и распределение	Маркетинговые предложения компаниям потребителям продукции. Реализация продукта на рынке
Этап 9. Монтаж и эксплуатация	Особенности изготовления и монтажа у потребителей
Этап 10. Техническая помощь в обслуживании	Подготовка электронных документов руководство пользователя. Гарантийное обслуживание
Этап 11. Утилизация	Переработка материалов, подлежащих повторному использованию. И утилизация не перерабатываемых материалов

формации о деятельности и длительности каждого этапа.

Имеется жизненный цикл такого наукоемкого оборудования (рис. 1), как силовой трансформатор. Содержание работ на каждом этапе представлено в табл. 1.

Для каждого изделия имеется вектор состояний на различных этапах, которые напрямую влияют на параметры всего жизненного цикла. Обозначим i-й этап как n_i. Пусть количество этапов – m. Тогда весь жизненный цикл (N) выглядит следующим образом:

$$N = (n_1,...,n_i,..,n_m).$$

Пусть $\varphi(N)$ – функция, описывающая влияние конкретного этапа на длительность жизненного цикла и, тем самым, на время его завершения. Далее примем, что $\xi(t)$ – плотность вероятности времени завершения ЖЦ при завершенных этапов. В качестве этой функции будем использовать гауссовскую плотность распределения [2]

Выбор такой функции распределения связан с тем, что длительность одного этапа может больше или меньшем чем длительность остальных, в то время как все остальные этапы будет выполняться примерно с одинаковым затраченным временем.

Пусть средняя длительность жизненного цикла составляет $t_0=E(\xi(t))$. Тогда с учетом вышесказанного

$$t_0 = \varphi(\mathrm{N})\bullet E(\xi(t)),\ f(t) = \varphi(\mathrm{N},t)\bullet\xi(t),$$

где $f(t)$ – плотность вероятности времени завершения ЖЦ.

Представим жизненный цикл как марковский процесс с непрерывным временем и дискретными состояниями, которые представляют собой конкретные этапы ЖЦ. Этот процесс полностью описывается следующим образом.

1. Этапы ЖЦ трансформатора $S=\{S_1, \ldots, S_n\}$, где n – число этапов.

2. Вектор начальных вероятностей $\mathrm{p}^{(0)}=\{\ \mathrm{p}^{(0)}\ (1),\ \ldots,\ \mathrm{p}^{(0)}\ (\mathrm{n})\}$ $=(1,0,\ldots,0)$.

3. Матрица переходных вероятностей $\mathrm{P}=\{\mathrm{p}_{ij}\}$, значения элементов которой зависят от стадии завершения ЖЦ.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
S1	1-p1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	p1	1-p2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S3	0	p2	1-p3	0	0	0	0	0	0	0	0
S4	0	0	p3	1-p4	0	0	0	0	0	0	0
S5	0	0	0	p4	1-p5	0	0	0	0	0	0
S6	0	0	0	0	p5	1-p6	0	0	0	0	0
S7	0	0	0	0	0	p6	1-p7	0	0	0	0
S8	0	0	0	0	0	0	p7	1-p8	0	0	0
S9	0	0	0	0	0	0	0	p8	1-p9	0	0
S10	0	0	0	0	0	0	0	0	p9	1-p10	0
S11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	p10	1

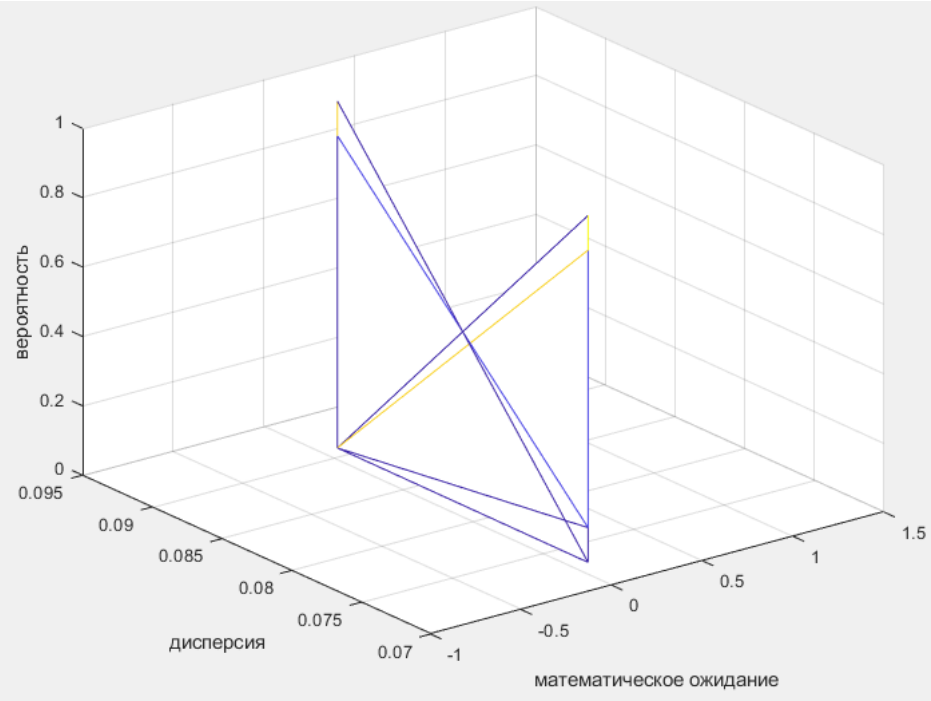


Рис. 2. Визуализация матрицы переходных вероятностей

Каждый этап жизненного цикла обладает собственной плотностью распределения времени своего завершения.

Тогда общий вид функции, выражающей искомую плотность распределения на i-м этапе, имеет следующий вид:

$$\xi_i(t,\mu_i,\sigma_i) = \frac{1}{\sigma_i\sqrt{2\pi}} \bullet \frac{(e^{-(t-\mu_i)^2})}{2\sigma_i^2}.$$

Как видно из матрицы переходных вероятностей, все состояния системы, кроме последнего, имеют два выхода: *один оставляет систему в текущем состоянии*, другой переводит систему в следующее состояние.

Следовательно, плотность распределения времени завершения *i-го* этапа будет иметь следующий вид:

$$f_i(t,\mu_i,\sigma_i,p_i) = p_i\xi_i((t,\mu_i,\sigma_i) + (1-p_i)\bullet w(t)\times$$
$$\times\int_{-\infty}^{+\infty}\xi_i((t,\mu_i,\sigma_i)\bullet\xi_i((t-\tau,\mu_i,\sigma_i)d\tau$$

Теперь требуется определить конкретные значения параметров (p_i, μ_i, σ_i) для каждого этапа. Имеется выборка значений времени завершения этапов жизненного цикла продукции, которая может использоваться для получения функции правдоподобия

$$L_i(t_{1i}, \ldots, t_{ni}, p_i, \mu_i, \sigma_i) =$$
$$= f_i(t_{1i}, p_i, \mu_i, \sigma_i)^* \ldots {}^* f_i(t_{ni}, p_i, \mu_i, \sigma_i).$$

Искомые параметры находятся путем решения системы уравнений

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \ln L_i}{\partial \mu_i} = 0 \\ \dfrac{\partial \ln L_i}{\partial \sigma_i} = 0 \\ \dfrac{\partial \ln L_i}{\partial p_i} = 0 \end{cases}.$$

В результате решения этой системы уравнений получается массив значений параметров, описывающий модель всего жизненного цикла электротехнической продукции

$$P=[(p_1, \mu_1, \sigma_1),\ldots,(p_n, \mu_n, \sigma_n)]$$

Полученный массив удобно визуализируется как набор из n точек в трехмерной системе координат.

На рис. 2 представлен полученный массив. С учетом рассмотрения классического ЖЦ, где последовательность этапов определена и не может изменяться. Время задается вектором с определенными значениями. Обозначения на графике: x – математическое ожидание, y – дисперсия, z – вероятность.

На основании полученного массива можно сделать вывод о том, что максимальная вероятность выполнения этапа возможно либо в начале жизненного цикла, либо в конце.

На основании этой информации конструируется векторы

$$T_{\min}=(p_{\max}, \mu_{\min}, \sigma_{\min}),$$

$$p_{\max}=\max(p_{1,\ldots,}p_n),\ \mu_{\min}=\min(\mu_{1,\ldots,}\mu_n),$$
$$\sigma_{\min}=\min(\sigma_1,\ldots,\sigma_n),$$

$$T_s=(p_s, \mu_s, \sigma_s),$$

$$P_s=E(p_{1,\ldots,}p_n),\ \mu_{\min}=E(\mu_{1,\ldots,}\mu_n),$$
$$\sigma_{\min}=E(\sigma_1,\ldots,\sigma_n),$$

и рассчитывается параметр

$$d=\sqrt{(T_{\min}-T_s)^2+(T_{\min}+T_s)^2},$$

который является удобной численной характеристикой упорядоченности во времени.

Заключение

По построенной математической модели жизненного цикла можно оценить его среднюю продолжительность, так как именно этот временной показатель можно изменить путем использования автоматизированных систем при неизменных показателях качества и надежности оборудования.

На основании математической модели, можно точно знать, какими новыми автоматизированными средствами настройки управлять жизненным циклом. Управление должно стать целесообразным с первого этапа ЖЦ продукта.

Модель позволяет оценить возможности управлять объектом так, чтобы получить метод расчета времени готовности любого продукта.

Список источников

1. *Солёный С. В., Романова М. С.* Возможные направления решения задач повышения эффективности управления жизненным циклом продукта электротехники // Завалишинские чтения '22: сб. докладов XVII Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике. Санкт-Петербург, 12–14 апреля 2022 года. СПб.: ГУАП, 2022. С. 238–240.

2. *Талыгин Е. А.* Построение математических моделей численной оценки параметров жизненного цикла технического документа =Construction Mathematical Models for Numerical Estimates of the Technical Paper Life Cyclt Parameters // Качество. Инновации. Образование. 2015. № 2. С. 54–57.

3. *Солёный С. В., Романова М. С.* Математическая модель жизненного цикла электроэнергетического оборудования // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации: тезисы докладов XXXI Междунар. научно-техн. конф. Алушта, 14–20 сентября 2022 года. Алушта: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2022. 170 с.

4. Модели жизненного цикла: учеб. пособие / Д. Б. Берг, Е. А. Ульянова, П. В. и др. Екатеринбург, 2014. 74 с.

5. *Звонарев С. В.* Основы математического моделирования: учеб. пособие. Екатеринбург, 2019. 112 с.

6. Цифровая трансформация. Анализ, тренды, мировой опыт. 2 изд., исправ. и доп. М.: 2019. 368 с.

7. ИСО 9000-1-94. Общее руководство качеством и стандарты по обеспечению качества. М.: ИПК стандартов. URL: //www.docload.ru/ Basesdoc/4/4993/index.htm (дата обращения: 29.12.2022).

8. *Дворяткина С. Н., Прокуратова О. Н.* Марковские процессы и простейшие модели теории массового обслуживания: учеб. пособие. Елец: Елецкий государственный университет, 2022. 81 с.

9. *Краснов А. Н.* Методологический подход к моделированию жизненного цикла инновационного продукта в АПК // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 1. Ч. 2. URL: https: //web.snauka.ru/issues/2015/01/46139 (дата обращения: 29.12.2022).

10. *Фунг Б. В., Данг М. Х., Гаврюшин С. С.* Разработка математической модели для процесса управления жизненным циклом многопильного станка нового типа // Машиностроение и компьютерные технологии. 2017. № 2. URL: https: //cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-matematicheskoy-modeli-dlya-protsessa-upravleniya-zhiznennym-tsiklom-mnogopilnogo-stanka-novogo-tipa (дата обращения: 10.01.2023).

УДК 620.9 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-346-351**

И. О. Саксонов*
магистрант
О. Я. Солёная*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ МИКРОГЕНЕРАЦИИ

Исследованы технические особенности подключения к электрической сети пользователей в различных регионах России с учетом альтернативных источников энергии. Приведено сравнение показателей вырабатываемой мощности различными источниками на основе ВИЭ в зависимости от времени года.
Ключевые слова: *возобновляемые источники энергии, микрогенерация, электростанция.*

I. O. Saksonov*
Postgraduate Student
O. Ya. Solenaya*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Peterburg State University of Aerospace Instrumentation*

ANALYSIS OF THE FEATURES OF THE FUNCTIONING OF OBJECTS WITH THE PRESENCE OF MICROGENERATION DEVICES

The technical features of connecting users to the electrical network in various regions of Russia are studied, taking into account alternative energy sources. A comparison is made of the indicators of generated power by various sources based on RES depending on the time of year.
Keywords: *renewable energy sources, microgeneration, power plant.*

Актуальность

С марта 2021 года в силу вступил закон о микрогенерации в России [1], согласно которому каждое физическое или юридическое лицо имеет право продавать электроэнергию энергосбытовой компании и получать из этого выгоду. Безусловно, для получения и реализации энергии с помощью возобновляемых источников, согласно закону о микрогенерации, нужно учитывать стандарты в области распределения и накопления электроэнергии. Поэтому вопросы, направленные на исследование технических особенностей построения систем электроснабжения на основе микрогрид и нормативной документации в этой области, являются актуальными.

Выбор системы электроснабжения объекта с микрогенерацией

В современном мире активно развиваются системы электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), поскольку многие владельцы частных предприятий и домов переходят на альтернативную энергетику, что приводит к их удешевлению [2]. Однако до сих пор в нашей реальности доступнее будет приобрести генераторы, которые работают на невозобновляемом топливе в связи с тем, что этот вид получения энергии является намного дешевле, чем ВИЭ. Несмотря на это, прогресс меняет технологии, в следствие чего люди, желают отказаться от невозобновляемых источников энергии.

Ветряная электростанция

Для многих ветряков номинальная скорость ветра должна быть в районе 10 м/с, чтобы коэффициент использования энергии ветра достигал наивысшего показателя. Также стоит обратить внимание на то, что для установки ветрогенераторов нужна прочная высокая мачта, чтобы скорость ветра была не заглушена ландшафтом и другими объектами. Немаловажным будет и то, что обычно ветрогенератор имеет приличный вес, который может доходить и до 70 кг [3].

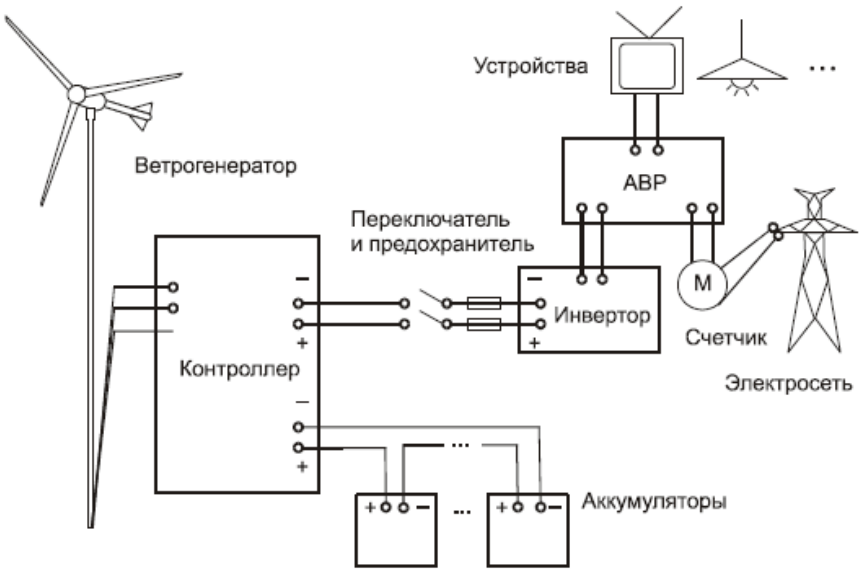


Рис. 1. Принципиальная схема системы электроснабжения объекта с ветрогенератором

В качестве оборудования для ветряной электростанции необходимо иметь:

– ветрогенератор горизонтального или вертикального исполнения;

– инвертор для преобразования напряжения. Имеются варианты совместного производства инвертора и контроллера заряда, например, maximum power point tracking (MPPT) – гибридный;

– аккумуляторы (гелевые и свинцово-кислотные);

– мачта, автоматы и провода для установки ветрогенератора (рис. 1).

Основным недостатком ветрогенераторов является сложность проведения их обслуживания и установки. Зачастую в России высота мачты превышает 15 м, в связи с этим необходимо иметь специальное оборудование для проведения монтажных работ на такой высоте, что приводит к дополнительным расходам при эксплуатации всей системы.

Также к недостаткам можно отнести:

– шум от работы лопастей, особенно при сильном ветре;

– необходимость проведения технического обслуживания минимум один раз в год, для поддержания системы в рабочем состоянии;

– при температуре ниже 0 °С смазка токоведущих частей может замерзнуть, что приведет к нерабочему состоянию ветряка;

– средняя скорость ветра в России находится в районе 2–5 м/с, в результате чего большинство моделей ветрогенераторов не подходят, так как общая площадь, для их идеальных условий работы в стране, составляет не более 2 % от населенных мест (горная, степная местность), где скорость ветра достигает в среднем до 10 м/с.

Преимущества ветрогенераторов:

– длительная выработка электроэнергии в связи с тем, что его работа зависит не от времени и сезона, а от скорости ветра;

– возможность размещения в труднодоступных местах.

Солнечная электростанция

Максимальная выработка электроэнергии с помощью солнечных панелей в России достигается летом с 10 до 15 часов в зависимости от региона. Для достижения максимального коэффициента полезного действия нельзя допускать попадание тени на элементы солнечной панели. В связи с этим их нужно устанавливать на открытом месте – на крыше или земле. Угол наклона относительно солнца выбирается в зависимости от климатических особенностей региона. В России это в районе от 30 до 60 градусов. Важно понимать, что зимой солнечные панели производят меньше электричества в связи с тем, что солнце уходит раньше по времени за горизонт. Монтировать и обслуживать солнечные батареи намного легче, чем ветрогенераторы. Стоимость элементов солнечного модуля значительно дешевле по сравнению с ветряком.

В качестве оборудования для солнечной электростанции необходимо иметь:

– солнечные батареи;

– контроллер заряда и инвертор;

– аккумуляторы;

– крепления и провода (рис. 2).

Рис. 2. Принципиальная схема системы электроснабжения объекта с солнечной панелью

Недостатки солнечных панелей:

– отсутствие выработки энергии ночью и зависимость от погоды. При облачной погоде выработка уменьшается на 20 % по сравнению с ясным днем. Для устранения данного недостатка достаточно приобрести аккумуляторы, которые смогут держать накопленный заряд в течение нескольких дней;

– зимой выработка электричества значительно уменьшается. В средней полосе России этот показатель может достигать в 5 раз больше по сравнению с летним периодом. Для южных регионов этот показатель уменьшается в 2 раза. Для компенсации этой особенности целесообразно применять гибридный вариант, а именно установку солнечной панели совместно с ветрогенератором;

– сложность при утилизации фотоэлектрических панелей.

Преимущества использования солнечных панелей:

– легкая установка, обслуживание и монтаж;

– долговечность и надежность, в связи с тем, что нет никаких работающих механизмов, которые изнашиваются. Средний срок службы 20–25 лет, что гарантирует окупаемость в течение нескольких лет. Единственным уязвимым местом является стекло, которое может треснуть при неправильной эксплуатации и защищенности;

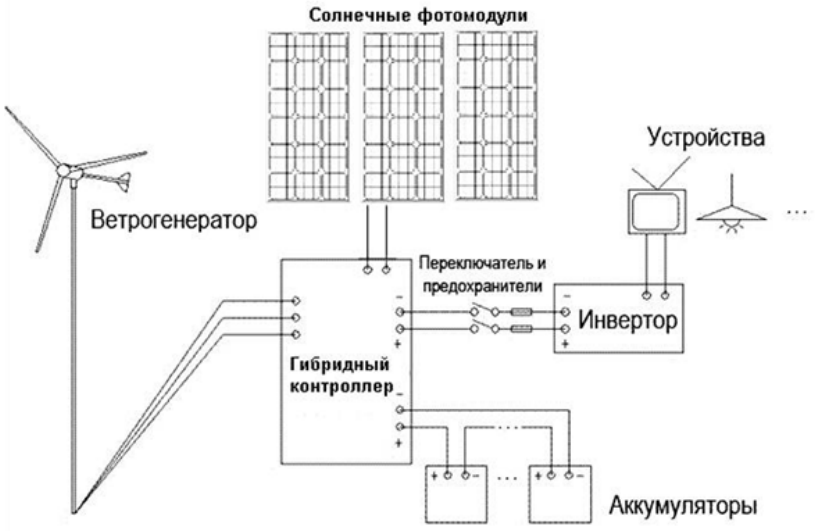


Рис. 3. Принципиальная схема системы электроснабжения объекта с ветрогенератором и солнечной панелью

– не издают шум, а также не занимают полезное место (если расположить их на крыше здания).

Гибридная электростанция

В качестве автономной системы электроснабжения используется комбинированный вариант, в котором могут быть совмещены солнечные панели и ветрогенератор. При этом стоимость такой системы увеличивается, а выработка электроэнергии будет иметь не самую высокоэффективную выработку и в целом мощность отдельных элементов будет не высокой (рис. 3). Стоит отметить, что такой вариант хорошо подходит для постоянной работы, так как ветрогенератор способен вырабатывать электроэнергию в ночное время суток.

Расчет системы электроснабжения

Важным фактором для выбора источника энергии влияет зона объекта электроснабжения. В качестве зоны объекта будут рассмотрены Санкт-Петербург и Ростов-на-Дону. Данные города выбраны в связи с тем, что они находятся на равнинной местности, а также в одном часовом поясе. Однако количество солнечных дней у них имеет значительное отличие.

Необходимо определить мощность потребляемых источников. Для этого нужно рассчитать среднее потребление энергии устройствами по формуле

$$W_{ac} = P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 ... + P_n \cdot t_n,$$

где W_{ac} – количество энергии, потраченное за день, P_n – номинальная мощность потребителя, Вт, t_n – среднее время работы этого потребителя в часах в сутки. Если устройство работает не каждый день (например, электроинструмент), то $t_n = t_{\text{мес}} / 30$, где $t_{\text{мес}}$ – время работы (в часах) данного потребителя за месяц.

Суммарный расход энергии, с учётом потерь

$$W_{ac} = 1{,}2 \cdot W_{DC},$$

где W_{DC} – номинальная мощность фотоэлектрических устройств.

В случае подключения электрооборудования к аккумуляторам принимается дополнительный коэффициент равный 1.2, для учета потерь энергии при преобразовании постоянного тока в переменный.

Значение средней солнечной радиации нужно учитывать для того, чтобы можно было определить производительность солнечных панелей в месяц для региона, в котором они будут установлены. Чтобы определить это значение солнечной радиации, откроем сайт NASA [4], в котором есть данные всех регионов их метеорологической службы. Сам раздел содержит различные данные, которые можно использовать для подсчета солнечных панелей и ветрогенераторов в связи с тем, что там же находится и среднее значение скорости ветра по месяцам и в реальном времени.

Немаловажным является учет данных, которые позволяют выявить оптимальный угол для расположения солнечных панелей. К тому же имеется возможность определить угол для каждого сезона, чтобы выработка электричества была максимально эффективной для потребителя [5]. После того, как были обозначены условия местности, нужно определить оптимальную схему электроснабжения потребителя для данного региона. В качестве примера возьмем типовое оборудование и установим необходимое количество среднего расхода электроэнергии устройств.

Выбор оборудования

Ветрогенератор HY-400L:
– номинальная мощность – 400 Вт;
– напряжение – 24 В;
– номинальная скорость ветра – 12 м/сек.;
– рабочая температура – от -40 °С до 85 °С.
Солнечная панель HH-Poly-240W:
– номинальная мощность – 240 Вт;
– площадь – 1.65 м^2;
– эффективность элементов (КПД) – 16.94 %;
– рабочая температура – от -40°С до +60 °С.

Далее необходимо узнать примерное количество энергии, которое потребляет пользователь, чтобы сопоставить их выходные характеристики на графике. В результате этого можно будет просмотреть графики потребления кВт·ч/сутки и выработки электроэнергии по месяцам. В качестве электроприемников примем: телевизор, холодильник, чайник, СВЧ печь, стиральную машину, пылесос, компьютер и собственное потре-

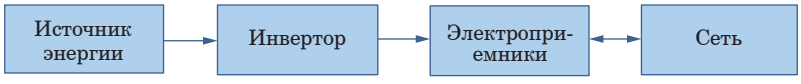


Рис. 4. Выработка солнечных панелей HH-Poly-240W 6 штук в Санкт-Петербурге

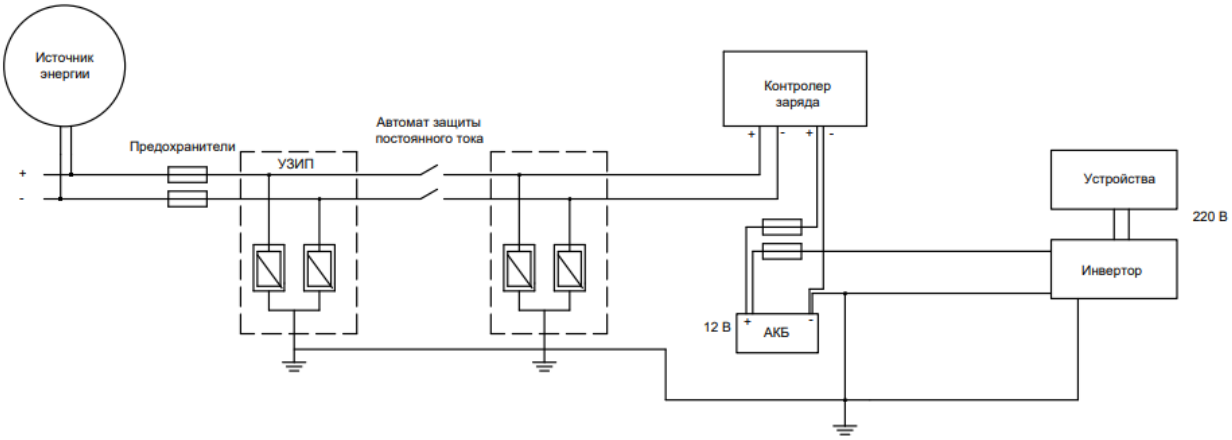


Рис. 5. Электрическая схема системы электроснабжения объекта

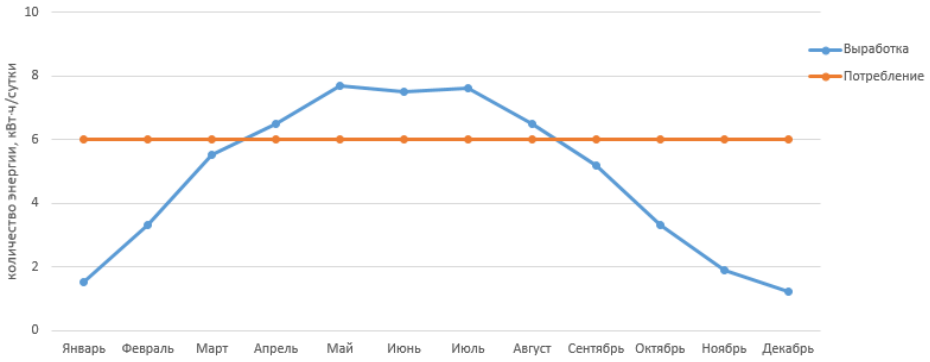


Рис. 6. Выработка солнечных панелей HH-Poly-240W 6 штук в Санкт-Петербурге

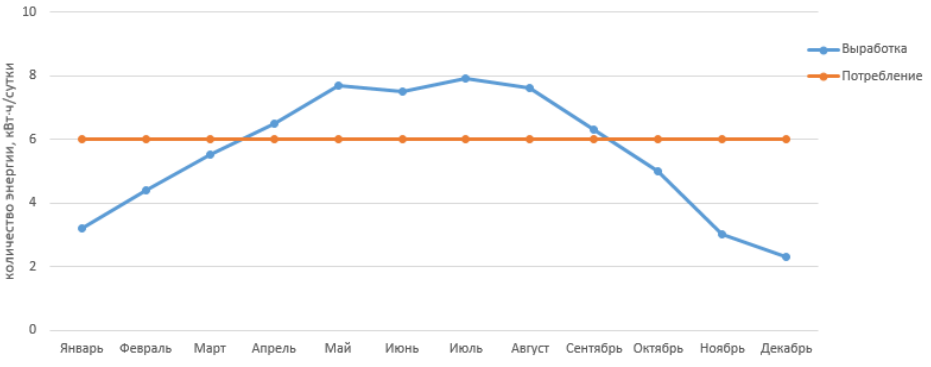


Рис. 7. Выработка солнечных панелей HH-Poly-240W 6 штук в Ростове-на-Дону

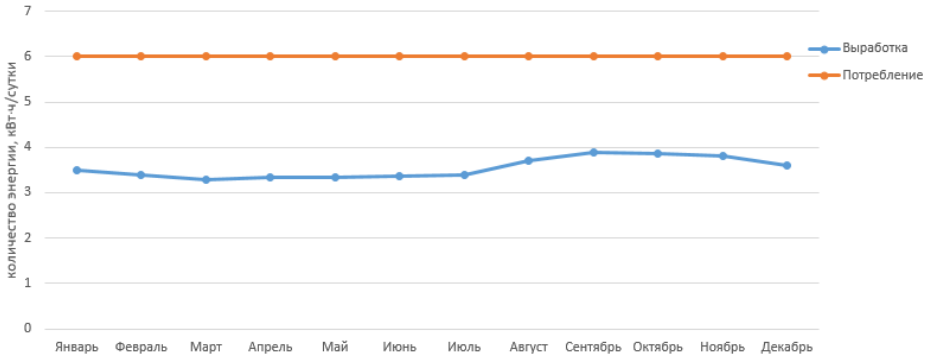


Рис. 8. Выработка ветрогенераторов HY-400 4 штуки в Санкт-Петербурге

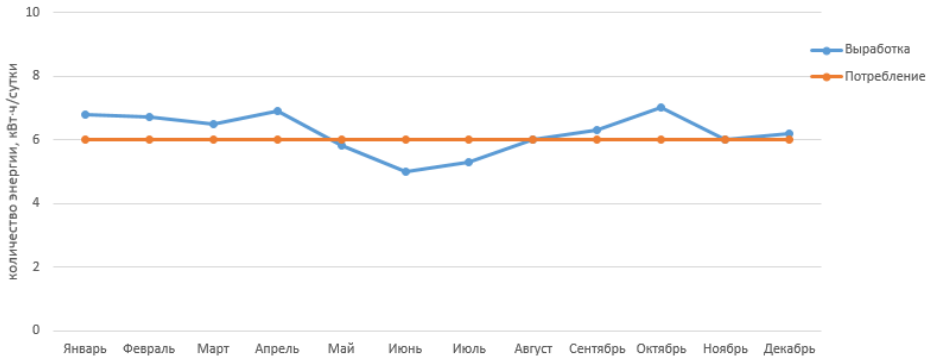


Рис. 9. Выработка ветрогенераторов HY-400 4 штуки в Ростове-на-Дону

бление инвертора, которые потребляют: 0.4; 0.8; 0.4; 0.3; 0.4; 0.8; 2.8 и 0.2 кВт·ч/сутки соответственно. Из этого следует, что среднее количество энергии 6 кВт·ч/сутки необходимо потребителю для полного удовлетворения своих потребностей.

Выберем 6 солнечных панелей, что в сумме будет составлять 1440 Вт, а также 4 ветрогенератора суммарной мощностью 1400 Вт. Структурная и электрическая схемы системы электроснабжения объекта приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

Из данных графиков (рис. 6–9) можно сделать вывод о том, что затраты удовлетворяют показателям энергоэффективности на графиках (рис. 6, 7) в летнее время суток. В зимнее время суток (рис. 6, 7) показатели производства электроэнергии не соответствует их потреблению в связи с тем, что количество солнечной радиации в это время года снижается. Производство электроэнергии ветрогенераторомри (рис. 9) удовлетворяет на протяжении всего года, кроме летнего сезона. При этом на графике выработки ветрогенераторов HY-400 (рис. 8) количество энергии, вырабатываемое ветрогенераторами, не удовлетворяет потребностям электроприемников на протяжении всех сезонов.

В летний период при использовании микрогрид на основе солнечных батарей можно выдавать электроэнергию в сеть и получать выгоду из выработки лишней энергии. Для ветрогенераторов этот период меняется с летнего на зимний, так как для них выгодно вырабатывать электроэнергию в это время в связи с тем, что в этот период скорость ветра больше.

Заключение

На сегодняшний день развитие альтернативной энергетики позволяет потребителям электроэнергии устанавливать различные системы электроснабжения, с помощью которых можно потреблять энергию и выдавать ее обратно в сеть. В результате этого потребители становятся полноценными участниками рынка электроэнергии в России, что делает электроэнергетическую отрасль более открытой и способствует развитию распределенной энергетики в стране.

Список источников

1. Федеральный закон от 27.12.2019 № 471-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике» в части развития микрогенерации» // Собрание законодательства Российской Федерации. 2003. № 13. Ст. 1177.

2. *Голицын М. В., Голицын А. М., Пронина Н. В.* Альтернативные энергоносители. М.: Наука, 2004. 83 с.

3. Солнечные батареи и ветрогенераторы. URL: https: //www.solnechnye.ru/batareya/plusy-i-minusy-vetrogeneratorov-i- solnechnyh-paneley.htm (дата обращения: 20.12.2022).

4. Atmospheric Science Data Center. URL: http: // eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?uid=3030 (дата обращения: 29.12.2022).

5. Автономная система энергоснабжения. URL: https: //neftregion.ru/chistaya-energiya/kak-rasschitat-avtonomnuu-sistemu-elektrosnabzheniya (дата обращения: 29.12.2022).

УДК 004.94 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-352-356**

И. А. Салова*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

К ВОПРОСУ О ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ УДЕРЖИВАЮЩЕГО МОМЕНТА МАГНИТНОЙ МУФТЫ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассмотрены факторы, влияющие на точность моделирования удерживающего момента магнитной муфты.
Ключевые слова: *магнитное поле, магнитная муфта, моделирование, метод конечных элементов.*

I. A. Salova
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ON THE ACCURACY OF MODELING THE HOLDING MOMENT OF A MAGNETIC COUPLING BY THE FINITE ELEMENT METHOD

The article considers the factors affecting the accuracy of modeling the holding moment of a magnetic coupling.
Keywords: *magnetic field, magnetic coupling, modeling, finite element method.*

В системах автоматики, таких как скважинные насосы, насосы для химической и фармацевтической промышленности магнитные муфты нашли широкое применение. К числу рабочих сред, перекачиваемых насосами, относятся кислоты, щелочи, растворители, коррозионно-активные составы, токсичные или ядовитые вещества и др.

Магнитная муфта играет роль передаточного механизма. Крутящий момент передается с ведущего вала на ведомый бесконтактным способом. Вместо механического зацепления используется сила магнитного поля. На рис. 1 схематически показана принципиальная конструкция магнитной муфты [1]. Принцип работы магнитной муфты состоит в следующем: ведущая полумуфта (на рис. 1 обозначена как наружная) располагается на валу, соединенном с электродвигателем. Вращение электродвигателя передается на ведущую полумуфту, образуя внутреннее

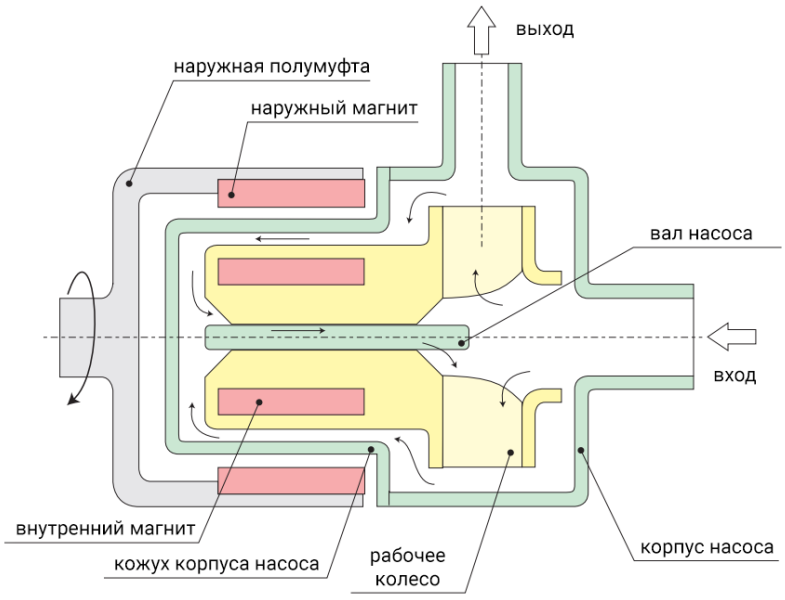


Рис. 1. Принципиальная конструкция магнитной муфты [1]

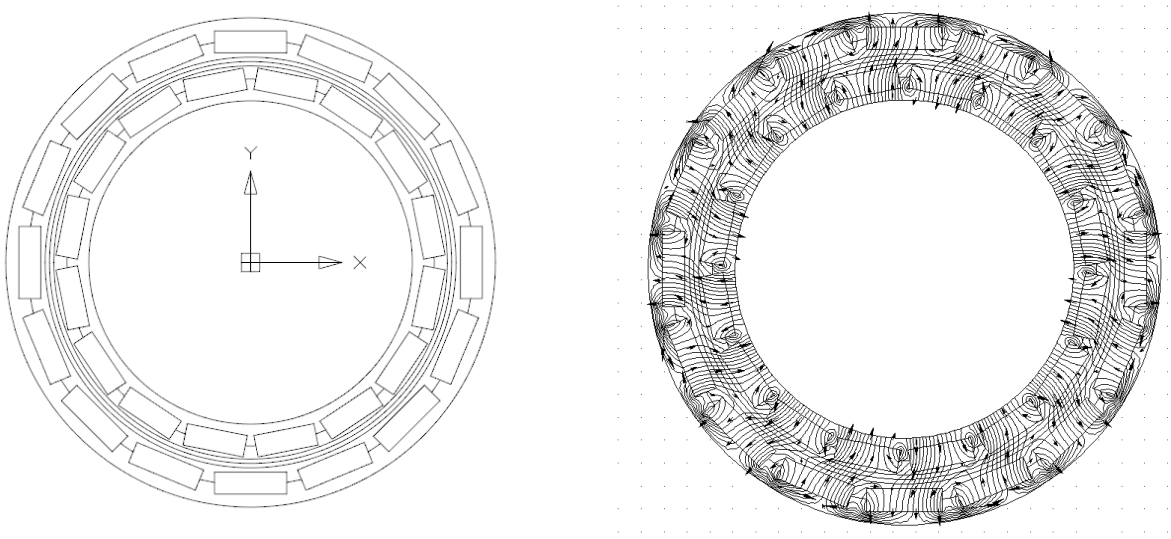


Рис. 2. Геометрическая модель и картина распределения магнитного поля магнитной муфты в положении получения значения максимального момента

вращающееся магнитное поле, которое приводит в движение ведомую полумуфту.

Разделителем является стакан, входящий в конструкцию кожуха корпуса насоса. При этом не нужно выводить вал из проточной части на электропривод, что позволяет сделать проточную часть полностью герметичной. Особенно это важно при работе с агрессивной средой. При превышении величины крутящего момента магнитная связь разрывается без повреждения или размагничивания муфты, но для запуска нужно вновь синхронизировать полумуфты. Такая особенность позволяет сохранить работоспособность привода при заедании, например, из-за разрушения подшипника или попадания в зацепление постороннего предмета.

Разработка магнитных муфт – задача индивидуальная, оптимизированная под конкретное техническое задание. Главное – это обеспечение требуемого максимального вращающего момента, который называется еще удерживающим моментом. Расчет этого момента удобно проводить, используя моделирование методом конечных элементов в программном комплексе ELCUT [2]. Моделирование проводится с использованием задачи магнитостатики. При подготовке модели элементам задаются свойства материалов: *B-H* кривая – для магнитопроводов, значение коэрцитивной силы – для магнитов, значения относительных магнитных проницаемостей – для магнитов, разделительного стакана и воздушного зазора. Коэрцитивная сила соседних магнитов направлена радиально и противоположно. На рис. 2 показана геометрическая модель и картина распределения магнитного поля магнитной муфты. Для получения максимального значения момента положение ведомой муфты относительно ведущей должно быть смещено на уголα=360/2n град., где n – число магнитов на каждой полумуфте. Это положение является критическим, после которого возникает срыв передачи момента.

На величину максимального момента влияет технологический разброс материалов составных частей муфты. Рассмотрим влияние различных факторов.

Влияние разброса коэрцитивной силы магнита

В модели используется магнит из SmCo марки YX-16 [3] с остаточной индукцией B_r=0,81÷0,85 Тл и коэрцитивной силой H_c=620÷660 кА/м. В качестве материала магнитопроводов используется сталь 2211 с *B-H* кривой, показанной на рис. 3. Магнитная проницаемость стакана μ=1,05. В табл. 1 представлены результаты моделирования.

Таблица 1

B_r, Тл	H_c, А/м	μ_0	M_{max}, Нм
0,81	620000	1,04	24,245
0,83	640000	1,03	25,8
0,85	660000	1,025	27,399

Таким образом, из-за разброса магнитных характеристик магнитов в пределах одной марки максимальный момент M_{max} может изменяться приблизительно на 6 % как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения относительно среднего значения (25,8). При этом считается,

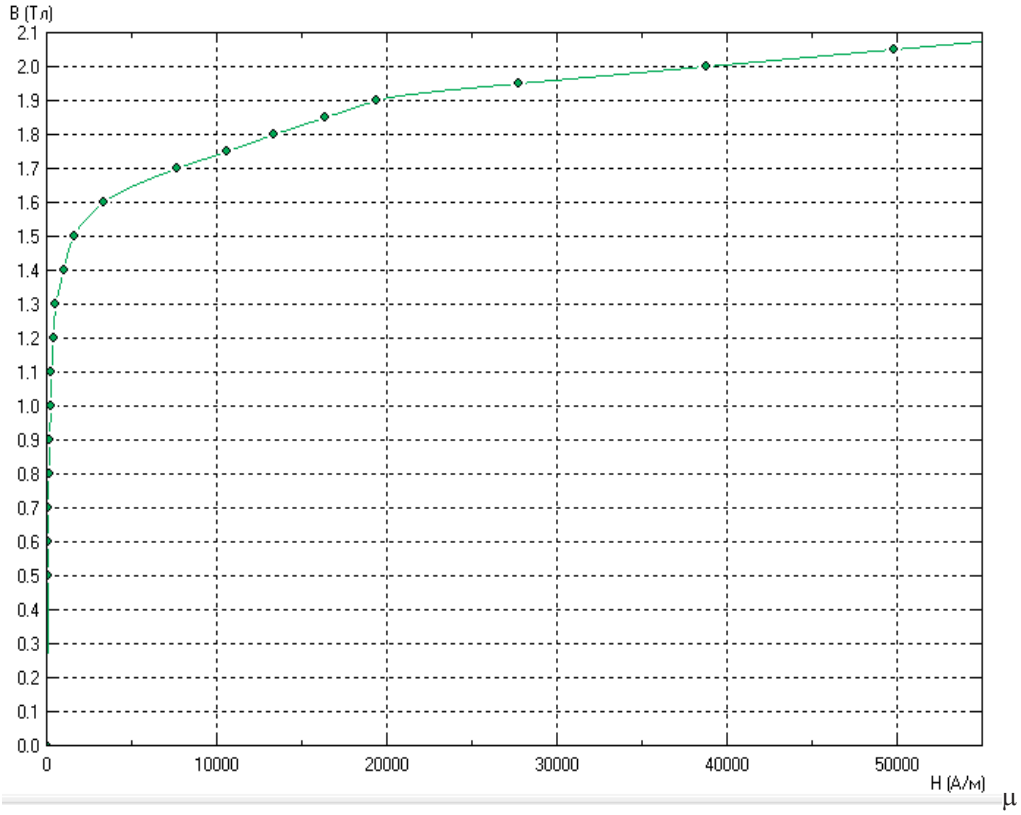


Рис. 3. B-H кривая стали 2211

что все магниты идентичны по B_r и H_c. В дальнейших исследованиях для сравнения будем использовать базовый вариант магнитных свойств магнита, при котором M_{max}=25,8 Нм.

Влияние материала герметизирующего стакана

Стакан изготавливается как из металла (нержавеющая сталь, хастеллой), так и из керамики, PEEK (полиэфирэфиркетон), ABS-пластика [4]. Благодаря высокой устойчивости к влиянию давления и температур магнитные муфты с герметизирующим стаканом из нержавеющей стали подходят для использования во взрывоопасной среде. Относительная магнитная проницаемость керамических и пластиковых стаканов равна 1. Значение относительной маг-

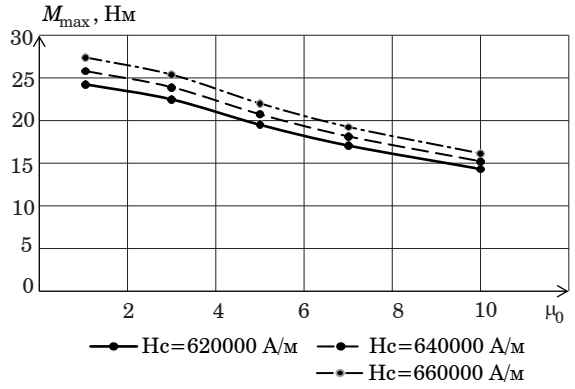


Рис. 4. Зависимость максимального момента магнитной муфты Mtax от относительной магнитной проницаемости μ_0 при различных значениях коэрцитивной силы магнита

Таблица 2

μ_0	H_c=620 кА/м		H_c=640 кА/м		H_c=660 кА/м	
	M_{max}, Нм	ΔM, %	M_{max}, Нм	ΔM, %	M_{max}, Нм	ΔM, %
1,05	24,245	0	25,8	0	27,399	0
3	22,48	–7,28	23,912	–7,31	25,383	–7,36
5	19,508	–19,51	20,745	–19,6	22,017	–19,6
7	17,074	–29,6	18,155	–29,6	19,266	–29,7
10	14,319	–40,9	15,223	–40,9	16,149	–41,1

нитной проницаемости нержавеющей стали всегда выше единицы (μ_0=1,05–1,1). Во время механической обработки она может увеличиваться до нескольких единиц. В вычислительном эксперименте μ_0 изменялось в пределах от 1,05 до 10. В табл. 2 и на рис. 4 представлены результаты моделирования.

Как следует из табл. 2, наблюдается значительное снижение удерживающего момента (на десятки процентов), которое, несомненно, следует принимать во внимание при проектировании муфты.

Влияние магнитных свойств материала магнитопроводов

Целью этой серии вычислительных экспериментов является выяснение возможности замены одного материала магнитопроводов на другой из ряда электротехнических сталей. Исследование проводилось для базового варианта магнитных свойств магнита. Значение μ_0 герметизирующего стакана из нержавеющей стали принято равным 1,05. В табл. 3 приведены значения максимального (удерживающего) момента при различных материалах магнитопроводов и проценты его изменения относительно момента, полученного при использовании стали 2211.

Как следует из табл. 3, изменение момента при замене базового материала магнитопроводов на другие марки электротехнической стали незначительно и не превышает 0,62 %.

Влияние случайного распределения значений коэрцитивной силы H_c магнитов на удерживающий момент

При сборке магнитной системы муфты при условии, что все геометрические размеры магнитов ведущей и ведомой муфты идеальны и не имеют отклонений, нельзя быть уверенным, что значение коэрцитивной силы одинаково для каждого магнита. Как было сказано в п.1 разброс по коэрцитивной силе *Нс* для одной марки магнитов составляет 620÷660 кА/м, то есть ≈3 %. Поэтому необходимо оценить влияние этого разброса на величину максимального удерживающего момента. Для решения этой задачи с помощью датчика случайных чисел из диапазона 620÷660 кА/м создается 5 рандомизированных выборок, в которых каждому магниту назначается свое значение коэрцитивной силы. Пример для одной выборки показан в табл. 4. В результате моделирования были получены значения максимального удерживающего момента, а также проценты их отклонений от номинального момента M_{max}=25,8 Нм (табл. 5).

Как следует из результатов вычислительного эксперимента, отклонение от номинального момента составляет не более 0,8 %, что свидетельствует о том, что влияние магнитов из одной партии с различной коэрцитивной силой существенно не влияет на максимальный удерживающий момент муфты.

Таблица 3

Марка стали	1211	1311	1411	1511	1514	1521	1571	2011
M_{max}	25,797	25,797	25,718	25,716	25,757	25,896	25,92	25,707
ΔM, %	-0,011	-0,011	-0,318	-0,326	-0,167	0,372	0,465	-0,360
Марка стали	2013	2111	2211	2311	2411	3411	3413	3423
M_{max}	25,862	25,689	25,8	25,64	25,759	25,95	25,874	25,691
ΔM, %	0,240	-0,430	0	-0,620	-0,159	0,581	0,287	-0,422

Таблица 4

	Номера магнитов ведущей полумуфты							
№	1	2	3	4	5	6	7	8
Нс, кА/м	652	649	631	655	636	649	628	633
№	9	10	11	12	13	14	15	16
Нс, кА/м	648	642	658	631	654	659	631	626
	Номера магнитов ведомой полумуфты							
№	1	2	3	4	5	6	7	8
Нс, кА/м	625	638	659	644	634	637	654	645
№	9	10	11	12	13	14	15	16
Нс, кА/м	627	624	646	624	637	647	641	639

Таблица 5

	Номер рандомизированной выборки				
	1	2	3	4	5
M_{max}	25,87	25,94	25,7	26,0	25,94
Δ, %	0,27	0,55	–0,39	0,78	0,54

Влияние температуры на величину удерживающего момента

В стаканах из нержавеющей стали возникают вихревые токи, при этом стакан и магниты нагреваются. В свою очередь, при повышении температуры у магнитов изменяются магнитные свойства [5]. Эти изменения оценивают с помощью температурного коэффициента магнитной индукции $\alpha_B = \frac{\Delta B}{B_r \cdot \Delta t}$ и температурного коэффициента коэрцитивной силы $\beta_H = \frac{\Delta H}{H_c \cdot \Delta t}$, где B_r – остаточная индукция; H_c – коэрцитивная сила; Δt – изменение температуры относительно 20°С, ΔB и ΔH – изменения индукции и коэрцитивной силы, вызванные изменением температуры на Δt °С. По данным [3], для магнитов марки YX 16 эти коэффициенты имеют значения: α_B= -0,05 %/°С и β_H= –0,3 %/°С. Оба коэффициента – отрицательные значения, следовательно, с увеличением температуры исходные значения будут уменьшаться. Относительная магнитная проницаемость магнитов определяется как $\mu = \frac{B_r}{H_c \cdot \mu_0}$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. При моделировании максимального удерживающего момента использован базовый вариант исходных данных. В табл. 6 приведены расчетные данные и результаты моделирования момента.

Выводы

1. Из рассмотренных выше технологических факторов наибольшее влияние на величину удерживающего момента оказывают два фактора: изменение относительной магнитной проницаемости герметизирующего стакана из нержавеющей стали и увеличение температуры магнитов за счет возникновения вихревых токов в стакане. В первом случае уменьшение момента составляет до 40 % в пределах изменения μ до 10, а во втором до 21 % при перегреве в 60°С. При выполнении стакана из неметаллических материалов не происходит потерь момента.

2. При наличии разброса магнитных характеристик магнитов в пределах одной марки максимальный момент M_{max} может изменяться приблизительно на 6 % как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения относительно среднего значения.

3. Изменение момента при замене базового материала магнитопроводов на другие марки электротехнической стали незначительно и не превышает 0,62 %.

4. При рандомизированной выборке магнитов из одной партии с различной коэрцитивной силой отклонение от номинального момента составляет не более 0,8 % и существенно не влияет на максимальный удерживающий момент муфты.

Список источников

1. Магнитная муфта: принцип работы, устройство, эксплуатация. URL: https: //ytspumps.ru/info/articles/printsip-deystviya/magnitnaya-mufta-printsip-raboty-ustroystvo-ekspluatatsiya/ (дата обращения: 10.11.2022).

2. ELCUT v.6.3. Комплекс программ для моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач. Руководство пользователя. СПб.: Производственный кооператив ТОР, 2016.

3. Технические характеристики магнитов SmCo. URL: https: //magnet-prof.ru/index.php/magnity-smco.html (дата обращения: 10.11.2022).

4. URL: https: //privod.ru/upload/files/MINEX.pdf (дата обращения: 10.11.2022).

5. *Преображенский А. А.* Магнитные материалы и элементы. М.: Высшая школа, 1976. 336 с.

Таблица 6

	Перегрев магнитов относительно t=20 °С					
	10	20	30	40	50	60
B_r, Тл	0,826	0,822	0,818	0,813	0,809	0,805
H_c, А/м	620800	601600	582400	563200	544000	524800
μ	1,058	1,087	1,12	1,149	1,184	1,221
M_{max}, Нм	24,848	23,96	23,072	22,081	21,157	20,228
% изменения относительно M=25,8Нм	–3,69	–7,13	–10,57	–14,41	–17,99	–21,6

УДК 621.313.2 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-357-359**

М. В. Сержантова*
кандидат технических наук, доцент
Д. К. Лебедев*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СОЗДАНИЕ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ ДПТ В ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯХ В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ SIMINTECH

Рассматривается структурная схема ДПТ в переменных состояния, составленная для ДПТ мехатронного модуля. Паспортные данные двигателя были рассчитаны исходя из технических требований модуля, в который входит двигатель. Для исполнения стукурной схемы будет использоваться программный пакет SimInTech.
Ключевые слова: *двигатель постоянного тока, структурная схема, переменные состояния, SimInTech.*

M. V. Serzhantova*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
D. K. Lebedev*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

CREATION OF A BLOCK DIAGRAM OF A DC MOTOR IN STATE VARIABLES IN THE SIMINTECH SOFTWARE PACKAGE

The article considers a block diagram of the DCT in state variables, compiled for the DCT of a mechatronic module. Passport data of the engine were calculated based on the technical requirements of the module, which includes the engine. The SimInTech software package will be used for the execution of the stucture scheme.
Keywords: *DC motor, block diagram, state variables, SimInTech.*

В электроприводах постоянного тока чаще всего применяются двигатели постоянного тока с независимым возбуждением. При независимом характере возбуждения обмотка возбуждения подключается к внешнему источнику питания. Схема электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением представлена на рис. 1 [1].

Как известно, управление такими двигателями преимущественно осуществляется по цепи якоря. Ниже представлены уравнения, описывающие электромеханические и электромагнитные процессы в ДПТ НВ

$$u_{\text{я}} = L_{\text{я}} * \frac{di_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} i_{\text{я}} + e_{\text{я}},$$

$$J\frac{d\omega_{\text{в}}}{dt} = M - M_H, \quad \omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}\frac{1}{n},$$

$$e_{\text{я}} = k_e \omega_{\text{в}}, \quad M = k_m i_{\text{я}},$$

где $e_{\text{я}}$ – противо ЭДС якоря; $i_{\text{я}}$ – ток якоря; $u_{\text{я}}$ – напряжение якоря; $L_{\text{я}}$ – индуктивность якоря; $R_{\text{я}}$ – сопротивление якоря; ω_m – механическая угловая скорость якоря; M – электромагнитный момент на валу двигателя; $M_{\text{Н}}$ – момент нагрузки; θ_m – механический угол поворота вала; J –

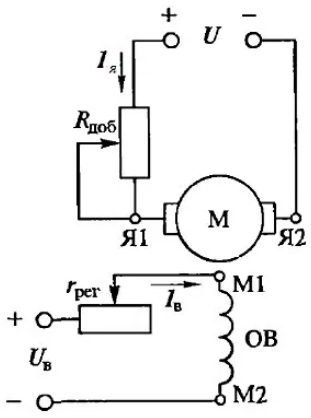


Рис. 1. Схема электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Таблица 1

Паспортные данные исследуемого двигателя

$P_{ном}$(кВт)	$u_я = u_B$(В)	$n_{ном}$(об/мин)	$I_я$(А)	$R_я$(Ом)	R_B(Ом)	J(кг·м^2)
0.45	110	3000	5.6	0.585	400	0.47

момент инерции ротора; k_e, k_m– конструктивные коэффициенты [2].

Паспортные данные двигателя, входящие в уравнения, были выбраны в ходе исследований под соответствующий мехатронный модуль. Исследуемый мехатронный модуль является роботизированной сборочной линей для сборки шестереней со шпонкой. Линия состоит из двух столов, одного конвейера и одного робота. Подбор двигателя позволяет избежать использования двигателя, сильно превышающего по мощности тот, что необходим для выполнения поставленной задачи. Паспортные данные двигателя исследуемого мехатронного модуля представлены в табл. 1.

Номинальный ток возбуждения, номинальный момент двигателя, конструктивные коэффициенты и индуктивность якоря рассчитываются из уравнений:

$$I_B = \frac{U_B}{R_B},\quad M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{30P_{ном}}{\pi n_{ном}},$$

$$k_M = \frac{M_{ном}}{I_я},\quad k_E = \frac{30(U_я - R_я I_я)}{\pi n_{ном}},$$

$$L_я = \frac{30u_я c_x}{\pi n_{ном} I_я},$$

где c_x – эмпирический коэффициент; $c_{x=}0{,}3 - 0{,}4$.

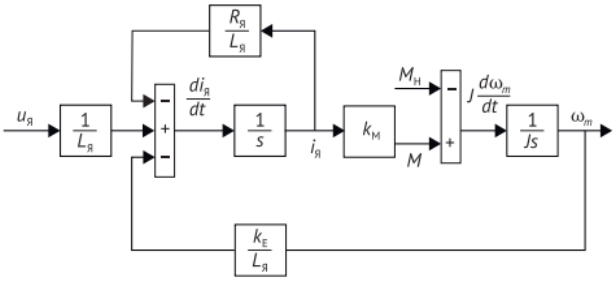


Рис. 2. Структурная схема ДПТ в переменных состояния

Структурная модель ДПТ в переменных состояния

Систему представленных выше уравнений можно представить в переменных состояния (записать в форме Коши)

$$\frac{di_я}{dt} = -\frac{R_я}{L_я} i_я - \frac{k_E}{L_я}\omega_m + \frac{1}{L_я}u_я,$$

$$\frac{d\omega_B}{dt} = \frac{k_M}{J} i_я - \frac{1}{J}M_н.$$

На основе математического описания ДПТ составляется структурная схема динамической системы, приведенная на рис. 2.

Далее в программном пакете SimInTech составляется совмещенная блок-схема, представленная на рис. 3.

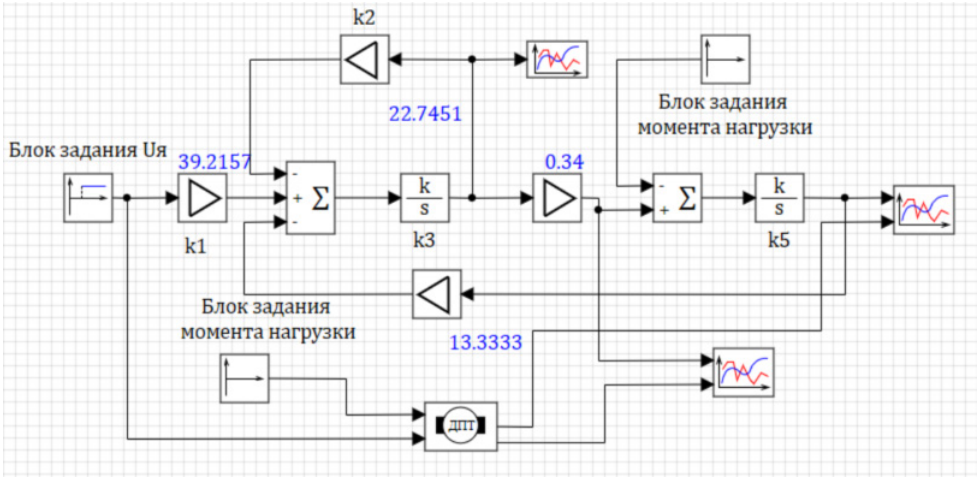


Рис. 3. Структурная схема ДПТ в переменных состояния в пакете SimInTech

Таблица 2

Значения коэффициентов k_1–k_6

$k_1 = \frac{1}{L_я}$	$k_2 = \frac{R_я}{L_я}$	$k_3 = 1$	$k_4 = k_M$	$k_5 = \frac{1}{J}$	$k_2 = \frac{k_E}{L_я}$
1/Гн	1/с	-	H / A	$1 / кг \cdot м^2$	В · с/Гн
39.2157	22.7451	1	0.34	2.2127	13.3333

В верхней части схемного окна расположена модель, соответствующая рис. 1, а в нижней части приведена модель ДПТ в виде типового блока библиотеки SimInTech. Момент нагрузки $M_Н$ зависит от свойств внешней среды объекта регулирования, от параметров исполнительного органа и механической передачи между ним и исполнительным двигателем [3].

Параметры двигателя задаются как Глобальные параметры с помощью вкладки «Скрипт» с использованием отдельных блоков k_1–k_6. Эти коэффициенты представлены в табл. 2.

Расчеты для модели были выполнены при скачкообразном изменении напряжения $u_я$ от 0 до 12 В и моменте нагрузки $M_Н$=0. Результаты моделирования представлены на рис. 4–6.

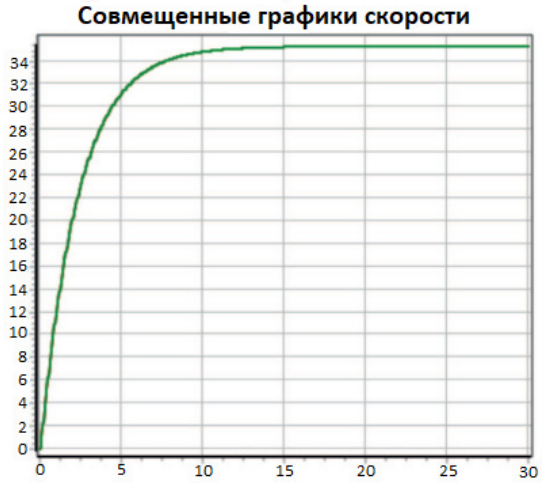


Рис. 4. Переходные процессы по скорости ω_m для моделей ДПТ (зависимость угловой скорости от времени)

Рис. 5. Переходные процессы по моменту для моделей ДПТ (зависимость момента от времени)

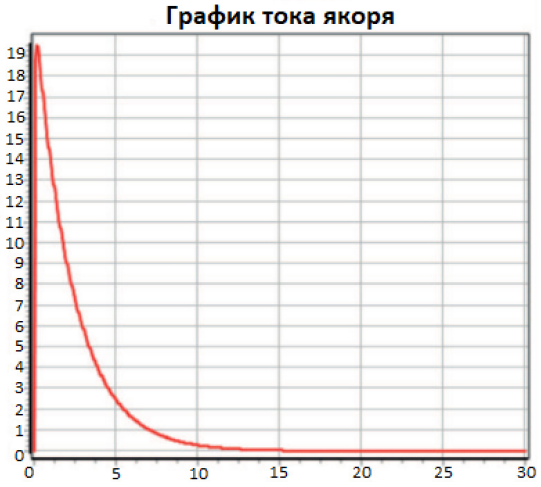


Рис. 6. Переходные процессы $i_я$ для моделей ДПТ (зависимость тока якоря от времени)

Анализ результатов переходных процессов в двух видах моделей показывает полное совпадение.

Заключение

Так как графики двух моделей полностью совпадают, можно сделать вывод, что структурная модель ДПТ в переменных состояния составлена верно. Проведенные расчеты также были выполнены верно.

Список источников

1. Виды электродвигателей постоянного тока. URL: https: //electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/ ustrojstva (дата обращения: 24.12.2022).

2. Создание математической модели двигателя постоянного тока: сайт. URL: https: //moluch.ru/archive/249/57298/ (дата обращения: 05.01.2023).

3. *Герман-Галкин С. П., Карташов Б. А., Литвинов С. Н.* Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения / Под ред. А. Н. Петухова, 2021. 494 с.

УДК 004.942 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-360-363**

М. Э. Создателева*
аспирант, ассистент
С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК СИСТЕМЫ 3D-ПЕЧАТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрена технология цифровых двойников, используемая в качестве инструмента оптимизации производственного процесса. Разработанный цифровой двойник системы 3D-печати с применением промышленной робототехнической системы повышает уровень автоматизации и оптимизации производств с помощью моделирования поведения системы в специализированном программном обеспечении.
Ключевые слова: *цифровой двойник, автоматизация производства, робототехническая система, оптимизация производственных процессов.*

M. E. Sozdateleva*
PhD Student, Assistant
S. V. Solyonyj*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

A DIGITAL TWIN OF A 3D-PRINTING SYSTEM WITH AN INDUSTRIAL ROBOTICS SYSTEM

This article examines digital twin technology as a tool for optimising the production process. The developed digital twin of a 3D-printing system using an industrial robotic system increases the level of automation and optimisation of productions by simulating the behaviour of the system in specialised software.
Keywords: *digital twin, production automation, robotic system, optimisation of production processes.*

Поскольку одним из факторов увеличения производительности является автоматизация, большое количество представителей разных отраслей промышленности прибегают к оптимизации процессов производства, поэтому средствами автоматизации сегодня в той или иной степени оснащаются все существующие и строящиеся объекты и системы. Это приводит к уменьшению финансовых затрат, человеческих ресурсов, а также сокращает временные издержки, как в отдельно взятых проектах, так и в массовом производстве.

Относительно недавно появившаяся технология цифровых двойников ежегодно наращивает темпы и объемы своего внедрения во множество предприятий. Возможности цифровых двойников не заканчиваются на задачах разработки объекта, технология также поддерживает его на всех стадиях жизненного цикла. Цифровой двойник, описываемый математическими зависимостями и базой данной параметров объекта, позволяет виртуально проектировать, анализировать и оптимизировать как детали и изделия, так и отдельные технологические процессы или целые производственные системы, а также дает возможность смоделировать состояние всего исследуемого объекта при изменении одной или нескольких характеристик любого из его элементов.

Цифровой двойник решает множество производственных задач, помогая оператору найти наиболее выгодное решение. Например, многочисленные испытания виртуального процесса или модели продукции позволяют выявлять недостатки и неточности, оперативно вносить правки, задать новые параметры и сразу же проводить повторные испытания уже с учетом внесенных корректировок. Необходимо отметить, что цифровой двойник продолжает собирать данные с реального физического объекта по мере его эксплуатации. Происходит это посредством датчиков, которые передают информацию в центр обработки, поэтому такой механизм позволяет выстроить обратную связь, ко-

торая в свою очередь становится ключом для разного рода усовершенствований.

Вследствие такой взаимосвязи возможно моделировать определенные ситуации исходя из искусственно задаваемых оператором параметров или же развития различных производственных условий.

Для создания цифрового двойника системы 3D-печати с применением промышленной робототехнической системы, необходимо провести выбор элементной базы, осуществить сборку, а также запрограммировать в специализированном пакете прикладных программ.

Цифровой двойник системы 3D-печати с применением промышленной робототехнической системы состоит из робота манипулятора, конвейерной ленты, системы 3D-печати, а также набора датчиков.

Для определения необходимых элементов системы необходимо учитывать фактор ограниченного пространства робототехнической ячейки, поэтому в качестве робота-манипулятора применяется KUKA KR 6 R900. Данный промышленный робот оборудован системой распознавания, является 6-осевым роботом, который может быть установлен практически на любой поверхности.

Используемым в ЦД захватом является двухпальцевый параллельный захват с центральным отверстием SCHUNK KTG для перемещение малых и средних объектов в ограниченном пространстве. Также на захвате расположены магнитоуправляемые коммутационные устройства – герконы – это электромеханические устройства, которые меняют состояние подключенной электрической цепи, используются как датчики положения, а также для того, чтобы уменьшить влияние деструктивного фактора, поскольку механические контакты подвержены износу. Их наличие в системе прописывается через условия в управляющей программе.

В качестве системы 3D-печати используется 3D-принтер типа FDM и конвейерная лента для подачи детали на дальнейший этап технологического процесса, а для отслеживания окончания работы принтера используется концевой выключатель. Для контроля перемещения рабочего органа без непосредственного контакта с ним в системе используются индуктивные датчики.

Эргономичный путь управления роботом осуществляет SmartPad, в основном использующийся для прописывания программы оператором вручную, обеспечивает упрощенный ввод данных благодаря использованию многоязычного графического интерфейса, отображаемого на большом сенсорном дисплее.

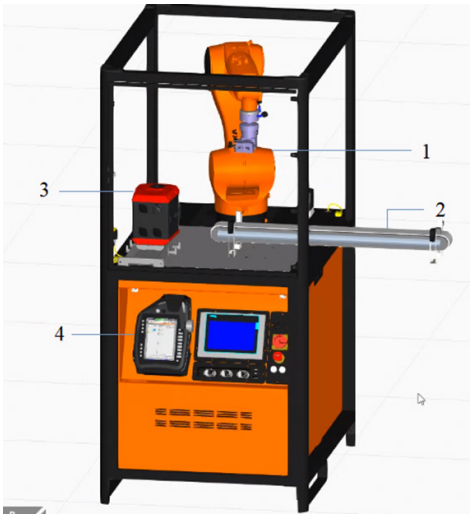


Рис. 1. Цифровой двойник системы 3D-печати с применением промышленной робототехнической системы: 1 – робот-манипулятор; 2 – ленточная конвейерная лента; 3 – 3D-принтер; 4 – SmartPad

После выбора всех необходимых компонентов производится сборка в общую систему, представленную на рис. 1.

Системой управления является KUKA KR compact, состоящая из управляющего ПК, энергоблока, логики защиты, ручного программатора smardPAD и панели присоединения, используемым протоколом общения является EtherCat, с помощью которого можно отправить одну команду для опроса и управления сразу несколькими ведомыми устройствами, которые в свою очередь считывают из Ethernet-фрейма необходимые данные или записывают данные для передачи, после чего фрейм пересылается следующему устройству.

HMI панель и внешний контроллер осуществляют взаимосвязь с KUKA KR compact с помощью протокола общения Profinet, определяющим связь с периферийными устройствами, осуществляет диагностику, настройку параметров, полный обмен данными между контроллерами и устройствами. Отображение взаимосвязей в специализированном программном обеспечении представлено на рис. 2.

Вся программа выстроена согласно алгоритму, представленному на блок схеме на рис. 3.

Тестирование цифрового двойника необходимо для того, чтобы понять, насколько устойчива система при разных условиях работы, корректно ли отрабатываются сигналы и настройки системы.

Тестирование является частью комплексного подхода к проектированию производственного

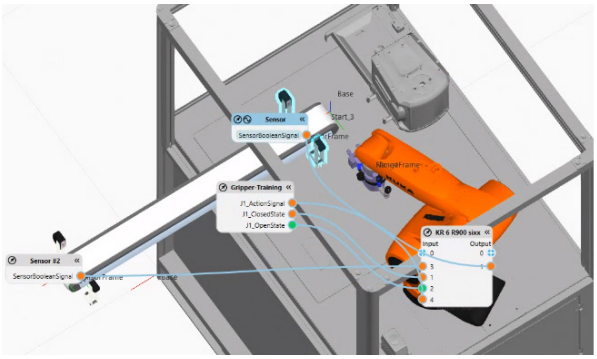


Рис. 2. Отображение взаимосвязей в специализированном программном обеспечении

процесса, и делает его обоснованным, поскольку процесс принятия решений относительно используемого оборудования, датчиков, системы управления и других составляющих опирается на многократные виртуальные испытания.

Также процесс тестирования документируется, уменьшая при этом показатель различных коммуникационных издержек, что полезно в случае проектирования системы специалистам, представляющим разные области.

На этапе тестирования можно отследить такие показатели, как время цикла, коллизии, вероятности отказов и причины их возникновения, корректность работы всей системы и многие другие.

В результате тестирования разработанного цифрового двойника система показала корректное функционирование, однако выявилось, что использование только индуктивных датчиков, расположенных конвейерной ленте, является нецелесообразным, поскольку в случае, если переносимым из 3D-установки объектом станет неметаллическое изделие датчики не сработают, что приведет к отказу системы или неправильному ее функционированию, поэтому для устранения причины вероятного отказа было принято решение о добавлении в систему фоторелейных датчиков.

Использование технологии цифровых двойников осуществляет анализ различных видов отказов и причин их возникновения, помогает оператору найти оптимальный путь решения последствий или избежания отказов, что влечет за собой повышение качества, надежности и гарантии безопасности сотрудников, а также минимизацию ущерба материально-технической оснащения производства. Цифровой двойник отображает оператору текущее состояние системы, виртуально воспроизводит работу роботизированной ячейки, позволяя выявлять недостатки и неточности, оперативно внести прав-

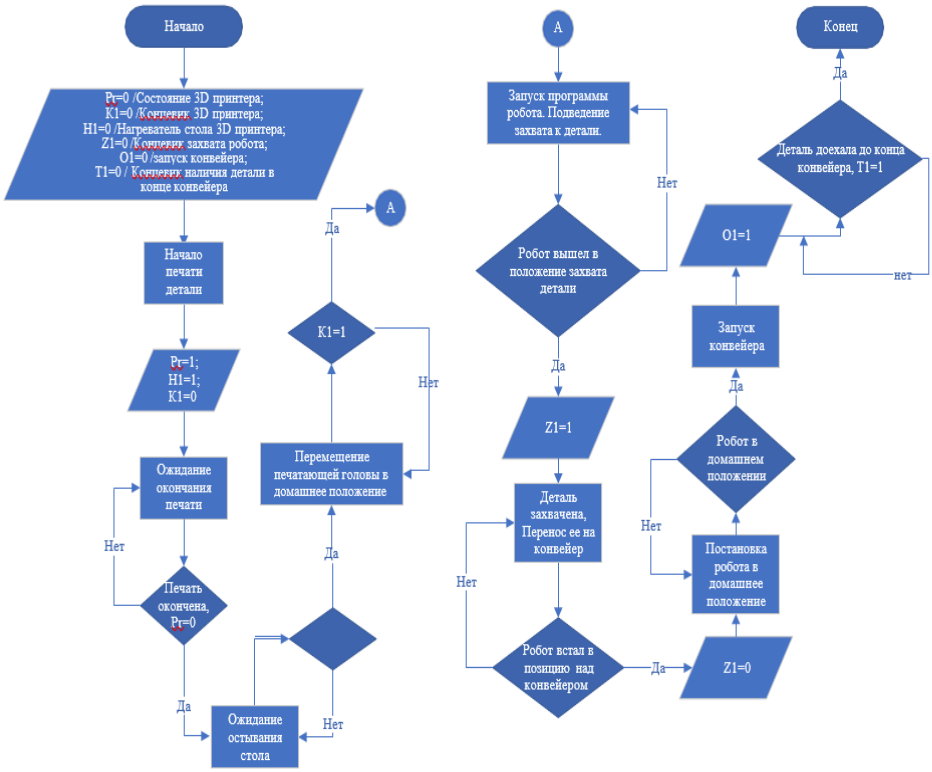


Рис. 3. Блок-схема алгоритма управления

ки, задать новые параметры и сразу же провести повторные испытания уже с учетом внесенных корректировок, что в свою очередь дает возможность существенно сократить количество испытаний непосредственно на практике.

Список источников

1. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900: 2015. Аддитивные технологические процессы. базовые принципы. М., 2020. 12 с.

2. ГОСТ Р 57700.37-2021, Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М., 2021. 11 с.

3. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство / О. Н. Гончарова, Ю. М. Бережной, Е. Н. Бессарабов, Е. А. Кадамов // Вестник Дона. 2016. № 4.

4. *Прохоров А., Лысачев М.* Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. М., 401.

5. *Фюер Ц., Вейсманн Ц.* Преимущества «цифрового двойника» // CAD/CAM/CAE Observer. 2017. N 5 (113). P. 50–53.

УДК 621.376.54 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-364-370**

А. А. Софронов*
студент
А. А. Мартынов*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ШИМ ДЛЯ ТРЕХФАЗНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Рассматриваются преимущества и недостатки трех методов широтно-импульсной модуляции. Синусоидальная ШИМ, ШИМ с введением третьей гармоники, пространственно-векторная модуляция. Моделирование осуществляется программного продукта MATLAB Simulink.
Ключевые слова: *ШИМ, широтно-импульсная модуляция, пространственно-векторная модуляция, гармонический состав.*

A. A. Sofronov*
Student
A. A. Martynov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

INVESTIGATION OF PWM METHODS FOR A THREE-PHASE VOLTAGE INVERTER

The article discusses the advantages and disadvantages of three pulse-width modulation methods. Sinusoidal PWM, third harmonic PWM, space-vector modulation. The simulation is carried out by the MATLAB Simulink software product.
Keywords: *PWM, pulse width modulation, SWM, space vector modulation, harmonic composition.*

В наши дни все активнее применяются приводы на основе синхронных двигателей с широкими диапазонами регулирования частоты вращения. Они нашли свое применение в электротранспорте, БПЛА, ЧПУ станках и робототехнике. Также широко распространены асинхронные двигатели, которые в промышленности служат в качестве привода станков, насосов, вентиляторов и т. д. В состав данных приводов часто входят инверторы напряжения и преобразователи со звеном постоянного тока. Основной целью данных приборов является преобразование постоянного или переменного напряжения в переменное напряжения определенной частоты и амплитуды. При этом также предъявляются требования к гармоническому составу выходного напряжения. Например, наличие высших гармоник может приводить к увеличению потерь в обмотках двигателя, снижению КПД или стать причиной перегрева. Использование оптимальных алгоритмов управления может помочь избежать этого или минимизировать затраты на создание высокочастотных L-C фильтров для подавления высших гармоник [1]. В данной статье будут рассмотрены основные и наиболее распространенные способы широтно-импульсной модуляции.

Синусоидальная широтно-импульсная модуляция

Метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ) заключается в формировании импульсов управления, путем сравнения двух сигналов. Один сигнал предназначен для модуляции (опорный), а другой несущей. На рис. 1 показано формирование импульсов для синусоидальной ШИМ. Частота несущей значительно уменьшена для наглядности. Обычно частота опорного сигнала составляет от 2 до 10 кГц [2].

Стоит отметить, что амплитуда напряжения на выходе при синусоидальной ШИМ имеет значение меньшее чем напряжение питания выходные напряжения инвертора при единичном значении напряжения питания задаются следующими уравнениями:

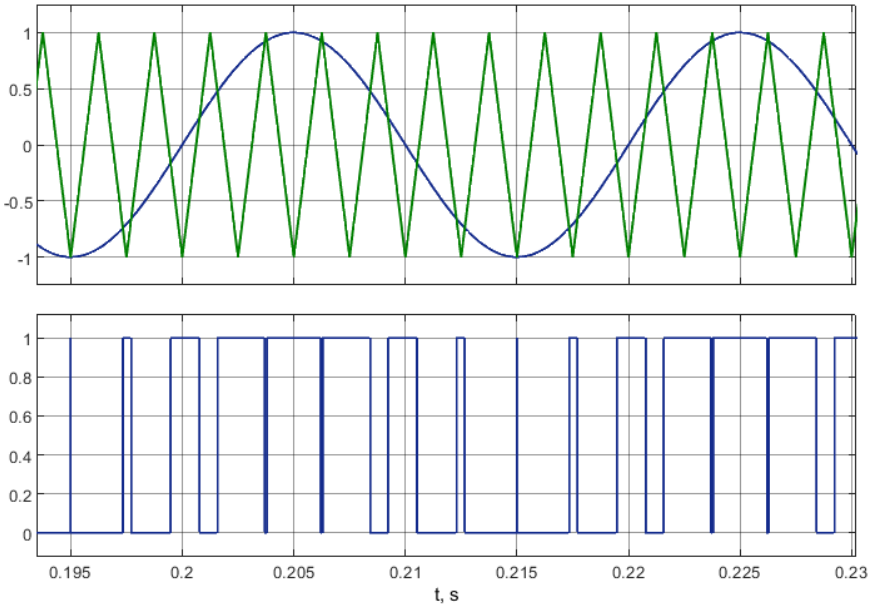


Рис. 1. Формирование синусоидальной ШИМ

$$U_A = 0{,}5 + 0{,}5\sin(\omega t),$$
$$U_B = 0{,}5 + 0{,}5\sin(\omega t - 120),$$
$$U_C = 0{,}5 + 0{,}5\sin(\omega t + 120).$$

Линейное напряжение является разностью мгновенных значений напряжений двух фаз и его максимальное значение может быть определено для фаз B и C в момент времени t=0:

$$U_{Л\max} = U_{B-C(0)} = \frac{1}{2} + \frac{\sin(-120)}{2} - \frac{1}{2} - \frac{\sin(120)}{2} = -\frac{\sqrt{3}}{2} = 0{,}866.$$

Как видно из формулы, на выходе получается линейное напряжение с амплитудой √3/2 или 0,866. Это приводит к неполному использованию напряжения звена постоянного тока. Это явление негативно сказывается на работе электроприводов из-за работы при пониженном напряжении, также полупроводниковые элементы схем используются не оптимально [3].

Синусоидальная широтно-импульсная модуляция с введением третьей гармоники

Синусоидальная ШИМ – это самая простая схема модуляции, но она не обеспечивает полного использования напряжение питания. Поэтому была разработана методика введения третьей гармоники в модулирующий сигнал. Стоит заметить, что третья гармоника не будет присутствовать в гармоническом составе выходного напряжения. Это будет продемонстрировано в дальнейшем.

Из рис. 2 видно, что амплитуда результирующей функции после сложения меньше единицы. Это позволит увеличить амплитуду исходных функций до 1.15 от исходной, при этом не вызвав перемодуляцию [4]. Тем самым повышается эффективность использования напряжения, сохраняя синусоидальную форму.

Пространственная векторная модуляция

Пространственная векторная модуляция (ПВМ) – это еще один вид ШИМ, который позволяет эффективно использовать постоянное напряжение и обеспечивать минимальные гармонические искажения. Этот метод часто применяется в схемах управления приводов с регулированием скорости вращения [2].

При ПВМ выходной вектор формируется на основе базовых векторов. Они могут быть представлены в системе координат αβ (рис. 4), при этом каждый из них характеризует определенное состояние каждого ключа [3].

Всего получается восемь базовых векторов. Из рис. 4 видно, что всего возможно 6 базовых векторов, которые образуют шестигранник и два нулевых вектора в начале координат. Вектора обозначаются V1–V8. Сектором называется любое сочетание двух векторов, угол между которым равен 60 градусам [2].

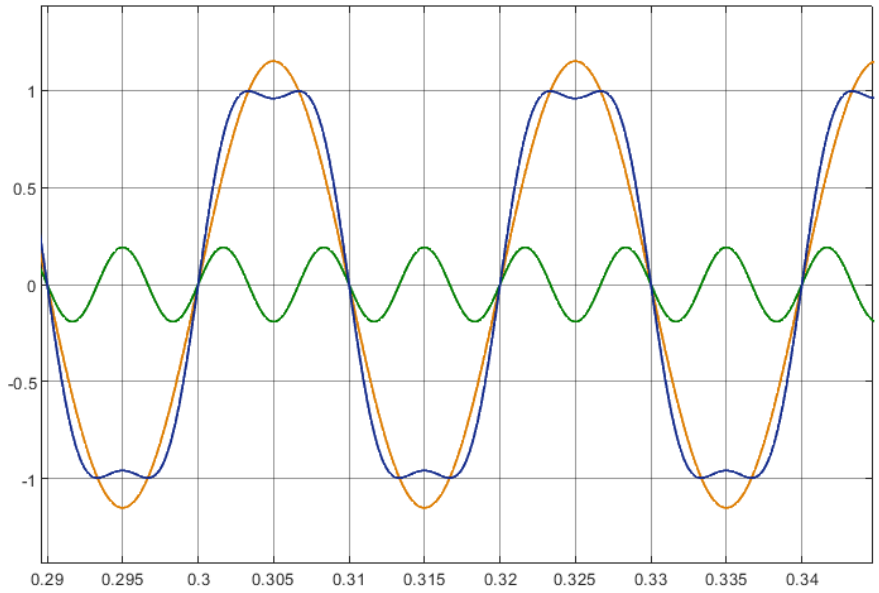


Рис. 2. Наложение первой и третьей гармоники

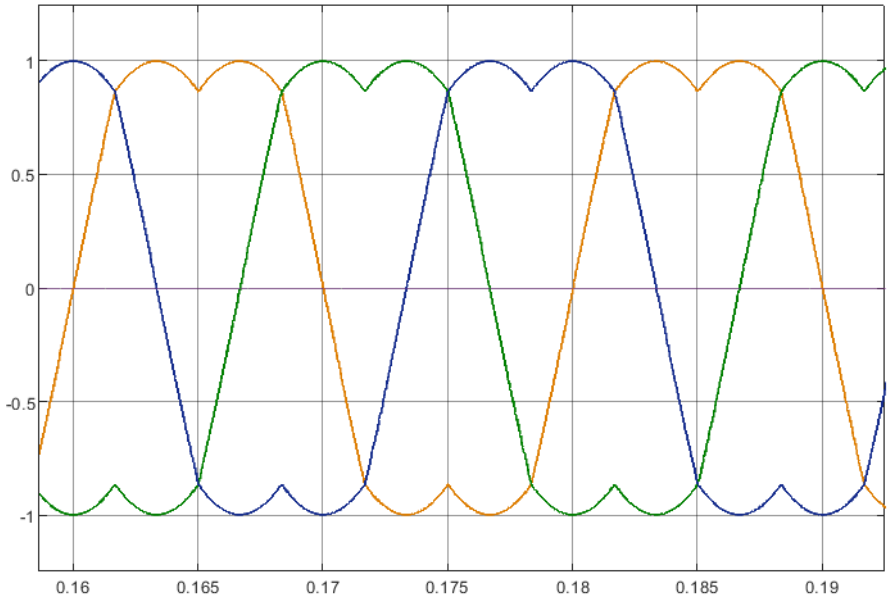


Рис. 3. Формируемые фазные напряжений при ПВМ

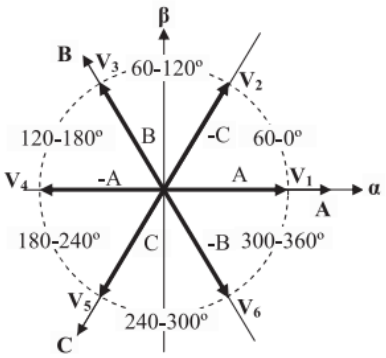


Рис. 4. Базовые векторы

Для любого сектора выходной вектор можно представить в виде комбинации двух базовых вектором, между которыми он заключен (рис. 5).

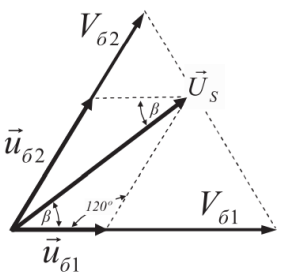


Рис. 5. Формирование вектора в секторе

Модули соответствующих векторов определяются согласно выражению:

$$\left|\overrightarrow{u_{б1}}\right| = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left|\overrightarrow{U_S}\right| \cdot \sin(60 - \beta)$$

$$\left|\overrightarrow{u_{б2}}\right| = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left|\overrightarrow{U_S}\right| \cdot \sin(\beta)$$

Линейное напряжение получается путем умножения фазного напряжения на √3. Максимальная амплитуда вектора U_S имеет минимум соответствующий середине сектора и равный $U_d/\sqrt{3}$. Следовательно, при работе инвертора входное напряжение будет использовано полностью [3].

Для перехода от модулей базовых векторов к длительностям ШИМ используются следующие уравнения:

$$t_{б1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{3t_{ШИМ}}{2U_d} \cdot \left|\overrightarrow{U_S}\right| \cdot \sin(60 - \beta) = \frac{\sqrt{3}\left|\overrightarrow{U_S}\right|}{U_d} t_{ШИП} \cdot \sin(60 - \beta),$$

$$t_{б2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{3t_{ШИМ}}{2U_d} \cdot \left|\overrightarrow{U_S}\right| \cdot \sin(\beta) = \frac{\sqrt{3}\left|\overrightarrow{U_S}\right|}{U_d} t_{ШИП} \cdot \sin(\beta),$$

$$t_0 = t_{ШИМ} - t_{б1} - t_{б2}.$$

Для облегчения расчетов можно перейти от именованных величин к относительным:

$$T_{б1} = \left|U_S\right| \cdot \sin(60 - \beta)$$

$$T_{б2} = \left|U_S\right| \cdot \sin(\beta)$$

$$T_0 = 1 - T_{б1} - T_{б2}$$

где $|U_S| = \sqrt{3}U_S/U_d$ – амплитуда вектора; Тб1, $T_{б2}$ – длительности приложения базовых векторов, между которыми осуществляется переход; T_0 – длительность нулевых векторов.

Последовательность включения базовых векторов в одном периоде ПВМ приведена в табл. 1 [3].

Таблица 1

Период ПВМ

0	$U_{б1}$	$U_{б2}$	0	$U_{б2}$	$U_{б1}$	0
$T_0/4$	$T_{б1}/2$	$T_{б2}/2$	$T_0/2$	$T_{б2}/2$	$T_{б1}/2$	$T_0/4$

Для каждого сектора очередность включения базовых векторов показана в табл. 2. Результатом таких переключений станет выходное напряжение, которое будет повторять форму с рис. 3. Стоит отметить, что чередование $T_{б1}$ и $T_{б2}$ в четных и нечетных секторах сделано с целью уменьшения количества переключений, а вместе с этим и к снижению динамических потерь в ключах.

Исследование гармонического состава

В качестве среды для моделирования процессов применяется MATLAB Simulink. Он имеет обширную библиотеку компонентов и инструментов, которая позволяет симулировать работу различных алгоритмов коммутации. В ней была создана модель, содержащая все три метода ШИМ (рис. 6). После проведения симуляции для каждого метода получена временная зависимость выходного напряжения. Затем при помощи быстрого преобразования Фурье определяется гармонический состав фазного напряжения.

Исследование осуществлялось на основе трехфазного инвертора напряжения. Напряжение питания принято 540 В. Это значение соответствует выходному напряжению трехфазной мостовой схемы выпрямителя. Частота переключения 2 кГц, модулирующего сигнала 50 Гц. Для сравнения рассматривались фазные напряжения на выходе инвертора и их гармонический состав. Результаты представлены ни рис. 7–12.

Заключение

Из рассмотрения трех методов ШИМ, следует что однозначно выделить лучший метод невозможно. Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки. Синусоидальная ШИМ обладает малыми гармоническими искажениями (рис. 10). Она также имеет самую простую реализацию и не требует высокопроизводительных контроллеров или сложных схем для работы, одним из существенных недостатков является неполное использование напряжения звена постоянного тока.

Метод введения третьей гармоники позволяет, компенсировать этот недостаток, при этом не ухудшив гармонический состав. Как было сказано выше, добавление третьей гармоники, не оказывает значительного влияния на гармонический состав. Из рис. 11 видно, что на графике отсутствует 3-я гармоника. Введение третьей гармоники чаще всего применяется в частотных преобразователях со звеном постоянного тока. Данный метод несмотря на свои плюсы слабо применим в векторных системах управления из-за сложностей, вызванных необ-

Таблица 2

Очередность включения базовых векторов

Сектор, град		Период ШИМ							
1	0–60	T	T0/4	Tб1/2	Tб2/2	T0/2	Tб2/2	T0/4	T0/4
		V	V8	V1	V2	V7	V2	V6	V8
		A	0	1	1	1	1	1	0
		B	0	0	1	1	1	0	0
		C	0	0	0	1	0	0	0
2	60–120	T	T0/4	Tб2/2	Tб1/2	T0/2	Tб1/2	T0/4	T0/4
		V	V8	V3	V2	V7	V2	V3	V8
		A	0	0	1	1	1	0	0
		B	0	1	1	1	1	1	0
		C	0	0	0	1	0	0	0
3	120–180	T	T0/4	Tб1/2	Tб2/2	T0/2	Tб2/2	T0/4	T0/4
		V	V8	V3	V4	V7	V4	V3	V8
		A	0	0	0	1	0	0	0
		B	0	1	1	1	1	1	0
		C	0	0	1	1	1	0	0
4	180–240	T	T0/4	Tб2/2	Tб1/2	T0/2	Tб1/2	T0/4	T0/4
		V	V8	V5	V4	V7	V4	V5	V8
		A	0	0	0	1	0	0	0
		B	0	0	1	1	1	0	0
		C	0	1	1	1	1	1	0
5	240–300	T	T0/4	Tб1/2	Tб2/2	T0/2	Tб2/2	T0/4	T0/4
		V	V8	V5	V6	V7	V6	V5	V8
		A	0	0	1	1	1	0	0
		B	0	0	0	1	0	0	0
		C	0	1	1	1	1	1	0
6	300–360	T	T0/4	Tб2/2	Tб1/2	T0/2	Tб1/2	T0/4	T0/4
		V	V8	V6	V1	V7	V1	V6	V8
		A	0	1	1	1	1	1	0
		B	0	0	0	1	0	0	0
		C	0	0	1	1	1	0	0

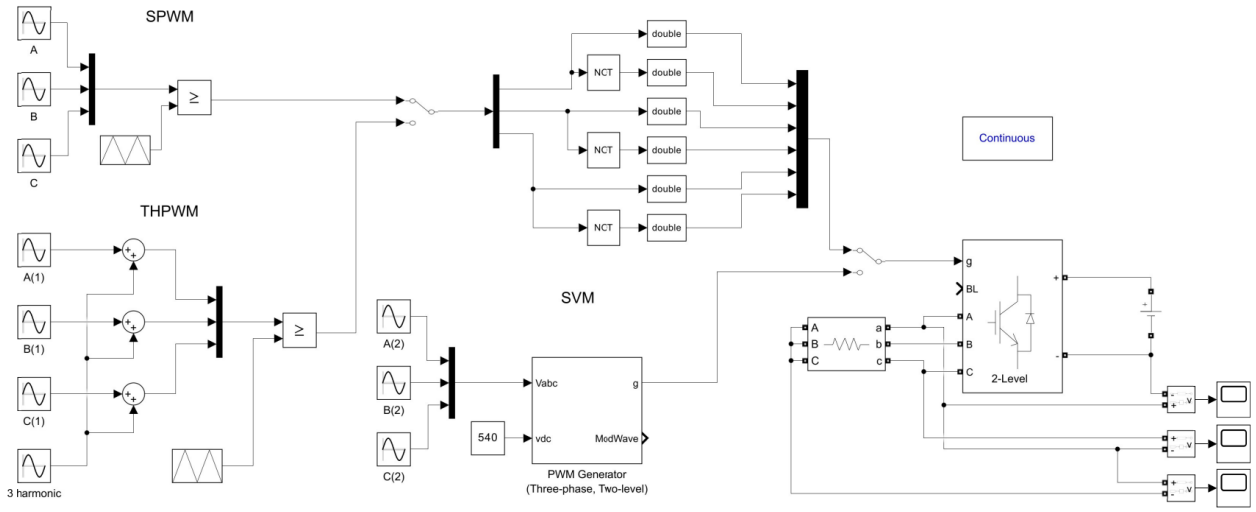


Рис. 6. Схема для исследования ШИМ

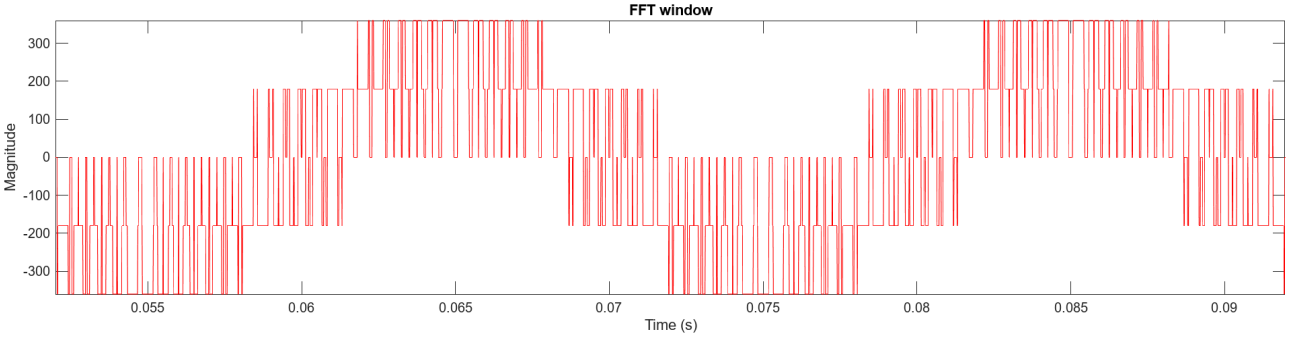


Рис. 7. Фазное напряжение синусоидального ШИМ

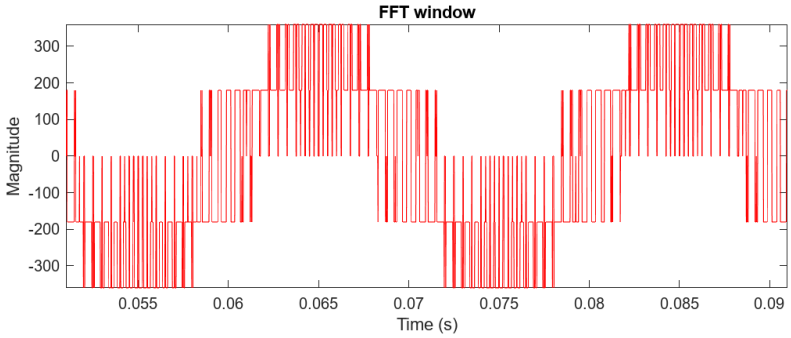


Рис. 8. Фазное напряжение синусоидального ШИМ с введением 3-й гармоники

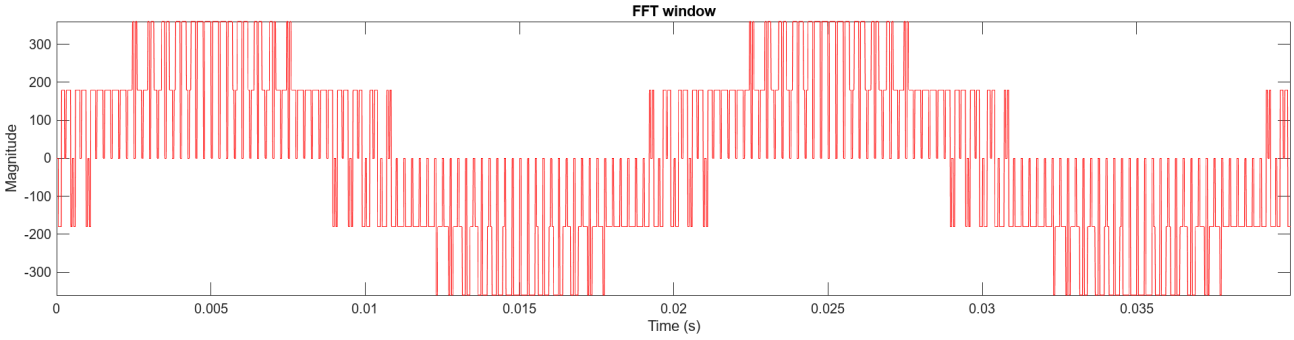


Рис. 9. Фазное напряжение ПВМ

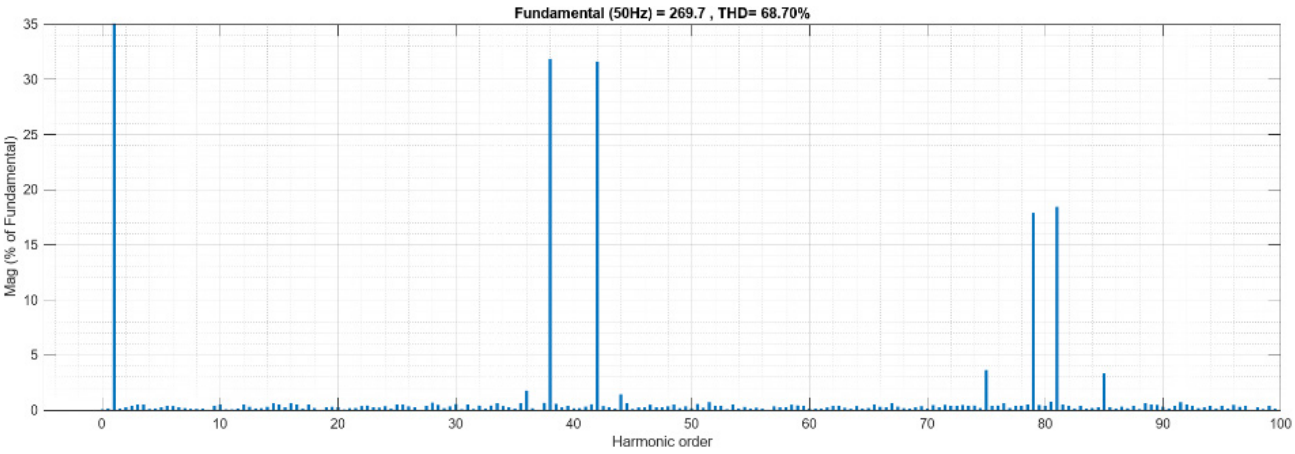


Рис. 10. Гармонический состав синусоидального ШИМ

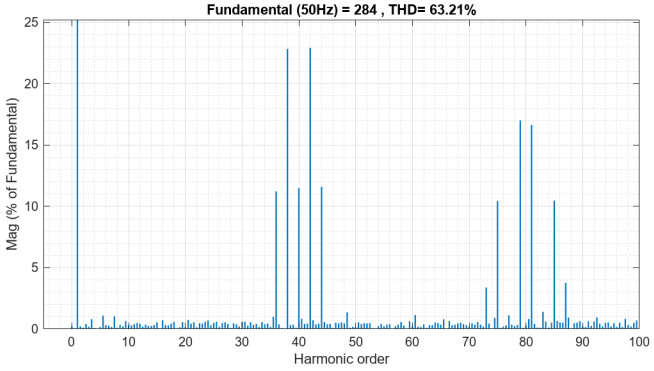


Рис. 11. Гармонический состав синусоидального ШИМ с введение 3-й гармоники

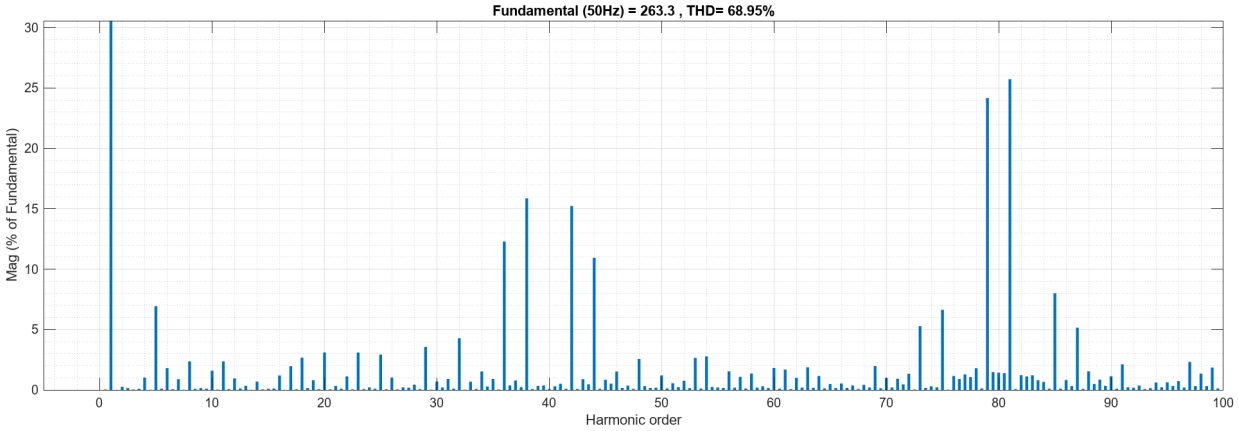


Рис. 12. Гармонический состав ПВМ

ходимостью точно поддерживать заданный вектор напряжения.

Альтернативным вариантом работы инвертора можно рассматривать совместную работу двух алгоритмов. В диапазоне напряжений от 0 до 0.86 можно использовать синусоидальную ШИМ из-за лучшего гармонического состава выходного напряжения. Затем при дальнейшем увеличении напряжения перейти на ШИМ с введением третьей гармоники, при этом будет получено максимальное использование напряжения. Усложнение алгоритма управления позволит совместить преимущества двух методов.

В данной статье был рассмотрен только один из вариантов ПВМ, который обеспечивает минимальные гармонические искажения, существуют другие методы ПВМ, например, для минимизации количества переключений транзисторов. Из рисунков 10–12 видно, что для ПВМ характерно самое низкое значение амплитуд гармоник для первого пика (38–42 гармоника). ПВМ 15 %, ШИМ с третьей гармоникой 23 %, синусоидальная ШИМ 32 %. Хотя значения для второго пика выше, но данные гармоники легче подавляются. ПВМ нашла широкое применение в системах векторного управления синхронными двигателями, где требуется поддерживать определенное положение вектора напряжения и корректировать его исходя из ориентации ротора двигателя.

Список источников

1. *Мартынов А. А. Ч.* II: Инверторы и преобразователи частоты: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2012. 144 с.

2. *Gangurde A., Mohan P.* Thakre Comparative Analysis of PWM Overmodulation Techniques in Three Phase Two Level Voltage Source Inverter // International Conference on Contents, Computing & Communication. 2022. N 3. P. 1–11.

3. *Калачев Ю. Н.* Векторное регулирование (заметки практика): метод. пособие. М.: ЭФО, 2013. 63 с.

4. *Nagasai K., Jyothsna T.* Harmonic Analysis and Application of PWM Techniques for Three Phase Inverter // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2016. N 3. P. 1228–1233.

УДК 378.147 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-371-374**

Н. К. Третьяков*
магистрант
В. П. Кузьменко*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БОРТОВОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА СКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ

Проведен анализ бортовой электросети переменного тока скоростных электропоездов, выявлены недостатки. Рассмотрены основные потребители электрической энергии, исследованы переходные процессы. Спроектирована структура электросети постоянного тока. Разработана электрическая схема преобразователя собственных нужд, выполнено моделирование работы.
Ключевые слова: *бортовая сеть, ток, напряжение, преобразователь, трансформатор.*

N. K. Tretyakov*
Postgraduate Student
V. P. Kuzmenko*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DESIGN OF ON-BOARD DC ELECTRICAL NETWORK OF HIGH-SPEED ELECTRIC TRAINS

The paper analyzes the on-board AC power grid of high-speed electric trains and identifies shortcomings. The main consumers of electric energy are considered, transient processes are investigated. The structure of the DC power grid has been designed. The electrical circuit of the auxiliary converter has been developed, the simulation of the work has been performed.
Keywords: *onboard network, current, voltage, converter, transformer.*

Введение

Скоростное железнодорожное сообщение является одним из наиболее востребованных способов современного перемещения. В России существует два типа напряжения контактной железнодорожной сети: 3 кВ постоянного тока и 25 кВ переменного [1]. Наиболее нагруженная скоростная магистраль, относящаяся к сети постоянного тока: маршрут Санкт-Петербург – Москва. По данному маршруту курсируют электропоезда «Ласточка» и «Сапсан» (Velaro RUS) [2]. Для комфортного передвижения в подвижном составе установлены системы обеспечения микроклимата (кондиционирования и отопления) и обеспечения стандартной бытовой электросети переменного тока (230 В 50 Гц) [3]. Также к оборудованию электропоезда, питающегося от трехфазной сети переменного тока, относятся воздушные компрессоры, вентиляторы охлаждения, зарядные устройства аккумуляторной батареи.

Бортовая электросеть переменного тока

Для формирования трехфазной электросети переменного тока 380/440 В 50/60 Гц на электропоездах установлены электрические преобразователи собственных нужд (ПСН). Например, на скоростном электропоезде «Сапсан» (конфигурация 10 вагонов), установлено 6 ПСН, суммарной мощностью 960 кВ*А, следовательно, каждый по 160 кВ*А. ПСН является преобразователем электрической энергии, подключенным к контактной сети, формирующим бортовую сеть переменного тока (рис. 1) [5].

На рис. 1 PWR – силовой модуль, построенный по схеме трехфазный мост, IGBT транзисторов (рис. 2), с синус фильтром; Tr – низкочастотный (60 Гц) трансформатор, обеспечивающий гальваническую развязку от контактной сети. Согласно ГОСТ 6962-75 наибольшая амплитуда напряжения контактной сети имеет значение равное 3850 В, следовательно, для построения ПСН необходимо применять транзи-

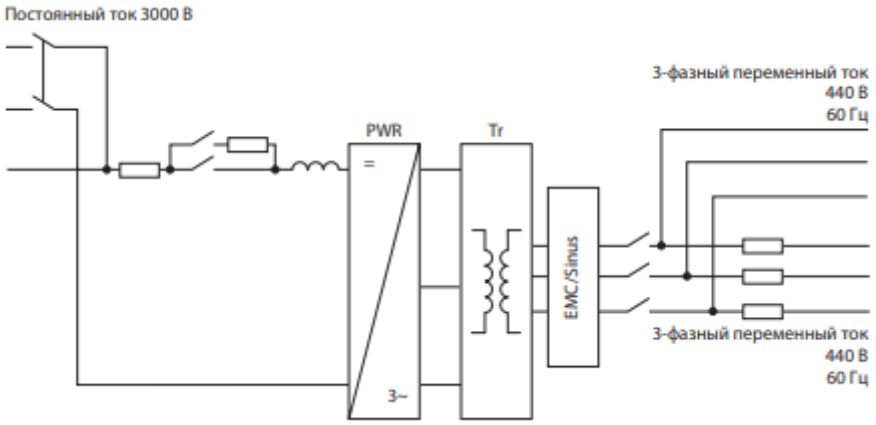


Рис. 1. Структурная схема ПСН электропоезда «Сапсан»

сторы на напряжение не менее 6 кВ [6], [7]. Данные транзисторы выпускаются только импортными производителями, что делает невозможным выполнение замены на отечественный аналог.

Отдельного внимания требует вопрос номинальной мощности ПСН. Выше была определена номинальная средняя мощность, но вследствие того, что потребителями электроэнергии являются различного вида электродвигатели, подключенные непосредственно к сети, предъявляются требования к импульсной мощности. При подключении электродвигателя к сети переменного тока прямым пуск (посредством контактора/реле) значение потребления превышается в 6–10 раз от номинального [7]. Данный переходный процесс включения электродвигателя повышает требования надежности как к транзисторам, так и к трансформатору ПСН.

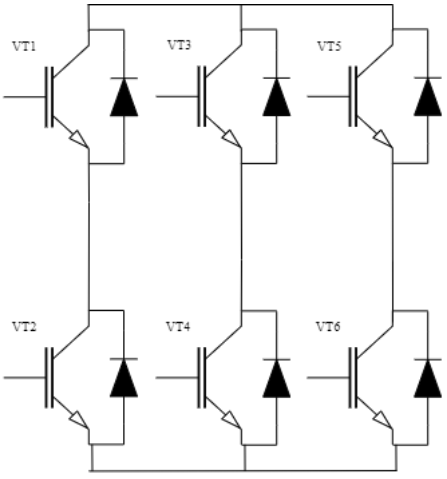


Рис. 2. Схема трехфазного моста, построенного на IGBT-транзисторах

Альтернативным решением построения ПСН, с использование транзисторав номинальным напряжением 1,7 кВ, является применение многоуровневой схемы. Данный тип преобразователей имеет сложную структуру управления и высокую вероятность выхода из строя, так как авария одного транзистора ведет к поломке всего устройства.

Бортовая электросеть постоянного тока

С учетом вышеизложенных недостатков применения и формирования бортовой электросети переменного тока предлагается новое решение – использование сети постоянного тока. Решение заключается в использовании ПСН на выходное постоянное напряжение 540 В с высокочастотным трансформатором и применением частотных преобразователей для управления электродвигателями (рис. 3).

Для уменьшения пусковых токов предлагается использовать частотные преобразователи, снижающие кратность пускового тока электродвигателя. Применение частотных преобразователей позволит перейти на плавную систему регулирования (изменения оборотов вращения) и снизит требования к коммутационному оборудованию.

Ключевым элементом системы электропитания является ПСН. Оптимальной схемой построения ПСН постоянного тока является полумостовая топология (Half bridge). Данное решение позволяет снизить количество применяемых транзисторов до двух штук (рис. 4).

Для выбора элементов устройства (силовые транзисторы, диоды выпрямителя, выходной дроссель) необходимо выполнить расчет (моделирование) работы в максимальных режимах с номинальной мощностью: при минимальном

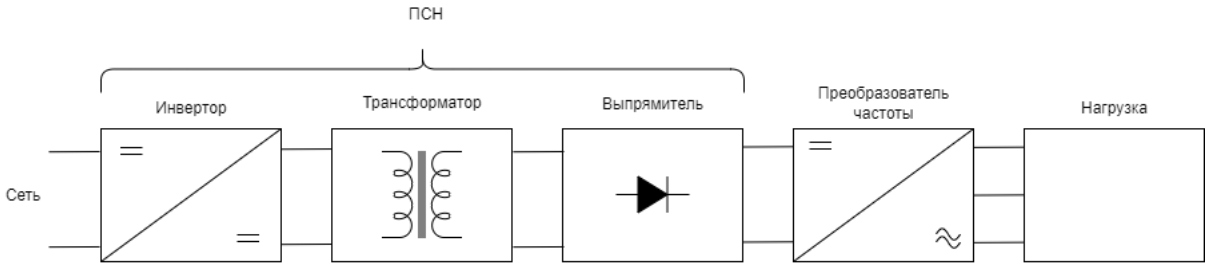


Рис. 3. Бортовая электросеть постоянного тока скоростных электропоездов

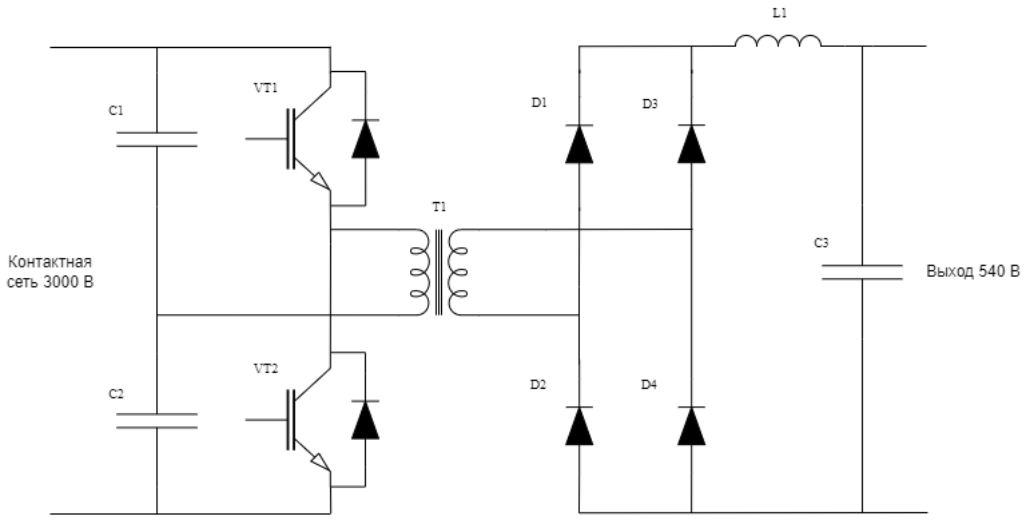


Рис. 4. Электрическая схема ПСН постоянного тока

и максимальном напряжении контактной сети (рис. 5).

Согласно результатам исследования наибольший амплитудный ток, протекающий через транзисторы, равен 185 А; индуктивность дросселя 257 мкН; пульсации тока на дросселе 120 А; соотношение витков высокочастотного трансформатора 1,93; максимальная амплитуда напряжения на выпрямительных диодах 996 В; частота работы 4 кГц.

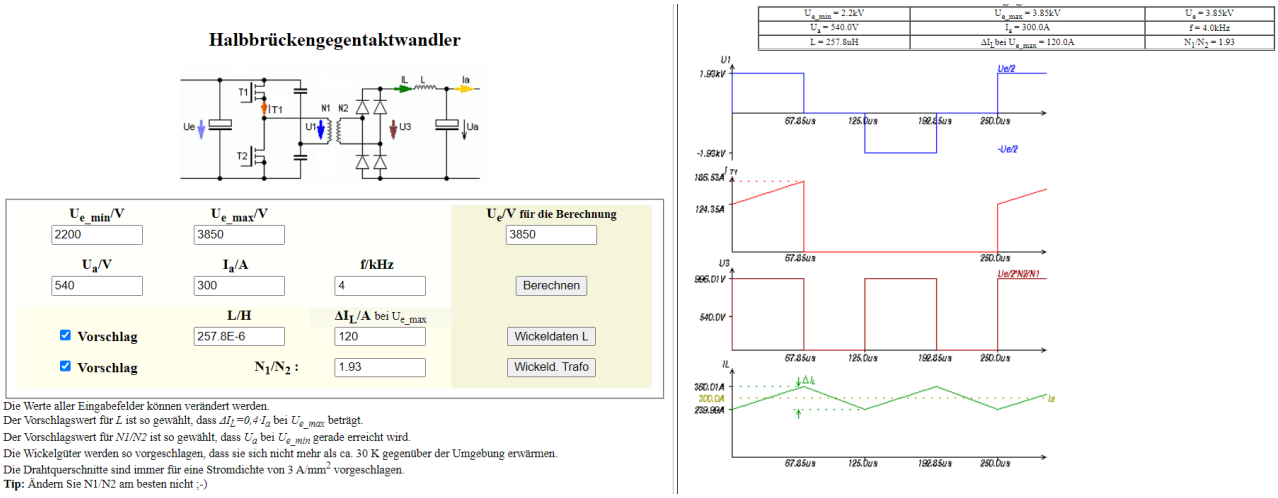


Рис. 5. Моделирование работы ПСН постоянного тока

Выводы

Использование в электропоездах бортовой электросети постоянного тока с частотными преобразователями позволит снизить требования к коммутационному оборудованию, уменьшит стоимость ПСН, позволит использовать плавное регулирование мощности. Проведенный в статье анализ обосновывает вывод об адекватности применения и возможности практической реализации бортовой электросети постоянного тока. Следующий шаг – поиск оптимальной аппаратной части и разработка макетного образца преобразователя собственных нужд.

Список источников

1. ГОСТ Р 57670-2017. Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров. М.: Стандартинформ, 2017. 1 с.

2. *Циргель В., Манглер Р.* Desiro RUS – перспективный пригородный электропоезд// Железные дороги мира. 2012. № 4. С. 44–51.

3. ГОСТ 29322-2014 (IEC 60038: 2009). Напряжения стандартные. М.: Стандартинформ, 2015. 3 с.

4. *Александров А. В.* Целесообразность применения бортовой сети постоянного тока на современном моторвагонном подвижном составе // Известия ПГУПС. 2015. № 2. С. 15–20.

5. *Липп А., Йон Д., Манглер Р.* Высокоскоростной поезд Velaro для России // Железные дороги мира. 2009. № 1. С. 36–50.

6. Фазовый модель SP-3000 WL. URL: https: //disk.yandex.ru/i/vlohC-u2dGypMA (дата обращения: 08.01.2023).

7. ГОСТ 6962-75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений. М., 1976. 2 с.

8. Влияние отрицательных последствий прямого пуска асинхронного двигателя на двигатель, рабочий механизм и питающую сеть. URL: https: // scienceproblems.ru/vlijanie-otritsatelnyh-posledstvij-prjamogo-puska/2.html (дата обращения: 04.01.2023).

УДК 621.311.1 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-375-378**

О. Б. Чернышева*
старший преподаватель
И. В. Елтышева*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЭНТРОПИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Рассмотрены вопросы применения информационной энтропии для оптимизации проектируемых распределительных сетей. Приведен пример практического использования информационной энтропии.
Ключевые слова: *электроэнергетика, распределительные сети, энтропия, надежность электроснабжения.*

O. B. Chernysheva*
Senior Lecturer
I. V. Eltyisheva*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

APPLICATION OF INFORMATION ENTROPY IN THE DESIGN OF OPTIMAL DISTRIBUTION NETWORKS

The issues of using information entropy to optimize the projected distribution networks are considered. An example of the practical use of information entropy is given.
Keywords: *electric power industry, distribution networks, entropy, reliability of power supply.*

Введение

Постоянно растущие объемы потребления электроэнергии приводят не только к ужесточению требований к ее качеству, надежности функционирования электрооборудования, но и к более сложным процессам управления технологическим процессом электростанций. Как правило, эти проблемы связаны со сложностью технического обслуживания оборудования электростанций, оперативной оценкой потребляемой мощности для оптимизации энергопотребления. Увеличение объемов генерации электроэнергии для удовлетворения потребностей конечных потребителей неразрывно связано с увеличением нагрузки на распределительные сети. Следовательно, повышение надежности распределительных сетей является одной из основных задач эффективного функционирования все энергосистемы.

Оценка надежности систем электроснабжения

Единая энергетическая система (ЕЭС) РФ представляет собой сложную распределительную сеть, состоящую из взаимодействующих между собой подсистем, которые, в свою очередь, являются функционально самостоятельными единицами общей системы. Основная задача системы – обеспечение конечного потребителя электроэнергией необходимого объема и качества, что и характеризует надежность системы в целом. На качество электроснабжения оказывает влияние большое количество факторов, значительная часть которых носит неопределенный характер: климатические условия, воздействие внешних факторов, различных как по происхождению, так и по частоте влияния. Протяженность территории страны, неравномерность температурных режимов и труднодоступных поселений свидетельствует о том, что практически невозможно в кратчайшие сроки перейти к полной цифровизации электроэнергетической области, однако, возможно повысить вероятность бесперебойного электроснабжения конечного потребителя путем модернизации существующих сетей и проектировании новых, имеющих оптимальные параметры с точки зрения надежности.

При проектировании распределительных сетей, как правило, используются радиальные

схемы электроснабжения, обладающие достаточной степенью надежности. Недостатком схем является большой расход материалов и коммутационных аппаратов защиты и автоматики, что приводит к удорожанию проекта в целом. Тем не менее, учитывая их простоту, в данной статье акцент делается именно на радиальные схемы.

В настоящее время надежность систем электроснабжения оценивается при помощи математических моделей реальных систем с применением вычислительных ресурсов. На практике наиболее часто применяются логико-вероятностные методы, основанные на элементах теории вероятности и математической статистики; марковские процессы случайных величин, позволяющие оценить надежность элементов схемы в режиме реального времени.

Основу оценки надежности составляют данные мониторинга основных параметров реальных сетей за определенный временной отрезок, такие как, частота отказа оборудования, среднее время восстановления и плановых отключений и т. д. В случае если данных мониторинга недостаточно, используются статистические данные показателей надежности аналогичного оборудования. Следует отметить, что данные мониторинга более полно отражают реальную картину поведения сети, в то время как статистические носят некоторый усредненный характер. И данные мониторинга, и статистические данные не учитывают влияние внешних факторов, а общая неопределенность в системе остается.

Применение энтропии при оценке надежности системы

Понятие энтропии впервые было представлено Р. Клаузиусом для описания теории тепловых машин, однако со временем К. Шеннон расширил область применения данного понятия на теорию информации, определив информационную энтропию как количественную меру неопределенности и информации [1]. Шенноном определена связь между количеством информации I и информационной энтропией H

$$H+I=1. \quad (1)$$

Одним из основных параметров теории надежности является вероятность безотказной работы элемента P, связанная с вероятностью отказа Q соотношением

$$P+Q=1. \quad (2)$$

Сравнивая (1) и (2), можно предположить, что энтропия может быть использована и в теории надежности систем электроснабжения, в частности, для оценки оптимальности структурной организации распределительных сетей на этапе проектирования. Проводя аналогии, можно отметить, что вероятность безотказной работы P, по сути, является полезной информацией I, а вероятность отказа Q – информационной энтропией.

Любую распределительную сеть можно представить некоторой физической системой, которая случайным образом может оказаться в том или ином состоянии, то есть системой, которой присуща некоторая степень неопределенности. Степень неопределенности системы характеризуется числом ее возможных состояний n и вероятностями нахождения в этих состояниях p_i. Для оценки меры неопределенности применяется энтропия, определяемая выражением [2]

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_a p_i,$$
$$\text{при условии } \sum p_i = 1, \quad (3)$$

где $\log_a p_i$ – мера неопределенности; a – основание логарифма.

Основание логарифма может быть любым числом, больше 1 и от него зависит единица измерения степени неопределенности. Если a =10, то неопределенность измеряется в дитах, но на практике наибольшее распространение получило значение a =2 и, соответственно, единица измерения – бит. Следует также отметить, что принятие a =2 имеет практическую ценность, так как отражает возможность нахождения элемента системы в одном из состояний: работоспособном или неработоспособном.

Рассмотрим возможность применения энтропии при структурном анализе проектируемой распределительной сети.

Для упрощения рассматриваемой модели, сделаем ряд допущений:

– конечные потребители относятся к III-й категории надежности, то есть перерыв в их электроснабжении не вызовет существенных материальных потерь и не приведет к серьезному нарушению нормальных условий жизнедеятельности;

– проектируемая система обладает ординарностью и отсутствием последействия, отказы являются случайными и независимыми событиями.

Для определения качественных характеристик (3) может быть представлено в виде суммарной энтропии всех элементов распределительной сети [3], [4]

$$H_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n}\left[H(p_i) + H(q_i)\right] =$$

$$= -\sum_{i=1}^{n}\left(p_i \log_2 p_i + q_i \log_2 q_i\right), \qquad (4)$$

где n – общее количество элементов в распределительной сети; $H(p_i)$ и $H(q_i)$ – информационная энтропия работоспособного и неработоспособного состояния элемента в распределительной сети.

Основой применения энтропии к оценке надежности распределительной сети является вычисление энтропии для каждого участка сети, связывающего конечного потребителя с источником питания. Полученные значения сравниваются с допустимыми граничными условиями, определяемые в соответствии с требованиями бесперебойного электроснабжения.

Для оценки надежности функционирования распределительной сети необходимо учитывать и вероятные совместные состояния элементов.

Пример применения информационной энтропии для оценки структурной надежности распределительной сети

В качестве примера рассмотрим простейшую распределительную сеть, представленную в виде размеченного графа (рис. 1). Потребители 1–4 получают электроэнергию от одного источника питания ИП. Каждое ребро на рис. 1 представляет собой условное обозначение реальной сети, состоящей из линий электропередач, трансформаторных подстанций и устройств коммутации. Соответственно, для любого ребра характерны свои параметры надежности (p_i, q_i), определенные по параметрам элементов. Вершинам графа соответствуют электроприемники.

Определим величину информационной энтропии для участков ИП–1–3, ИП–1–4 и ИП–2.

В качестве исходных данных примем вероятности отказа ребер q_i равными

$$q_1 = 6{,}5\cdot10^{-3};\ q_2 = 2{,}4\cdot10^{-3};\ q_3 = 4{,}15\cdot10^{-3};$$

$$q_4 = 2{,}9\cdot10^{-3}.$$

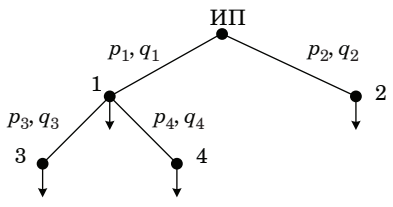


Рис. 1. Размеченный граф распределительной сети

Соответственно, вероятности безотказной работы p_i

$p_1 = 1 - 6{,}5\cdot10^{-3} = 0{,}9935;\ p_2 = 1 - 2{,}4\cdot10^{-3} = 0{,}9976.$

Используя (4), определим информационную энтропию для каждого элемента:

1-й элемент:

$$H(p_1) = -p_i \log_2 p_i = 0{,}9935 \log_2 0{,}9935 = 0{,}00935,$$

$$H(q_1) = -q_i \log_2 q_i = 0{,}0065 \log_2 0{,}0065 = 0{,}04722.$$

2-й элемент:

$$H(p_2) = 0{,}00346,\ H(q_2) = 0{,}02089;$$

3-й элемент:

$$H(p_3) = 0{,}00166,\ H(q_3) = 0{,}03284;$$

4-й элемент:

$$H(p_4) = 0{,}00418,\ H(q_4) = 0{,}02445.$$

Условия граничной энтропии определяются исходя из требований бесперебойного электроснабжения конечного потребителя и для 3-й категории надежности перерыв составляет 24 ч [5]. Учитывая возможные преднамеренные отключения, примем: для 2-го потребителя Т1=100 ч; 3-го – Т3=125 ч и для 4-го – Т4=110 ч.

Тогда вероятность бесперебойного электроснабжения и вероятность отказа равна:

$$p_2^* = T2/T = 8660/8760 = 0{,}9885;\ q_2^* = 0{,}0115;$$

$$p_3^* = T3/T = 8635/8760 = 0{,}9857;\ q_3^* = 0{,}0143;$$

$$p_4^* = T4/T = 8650/8760 = 0{,}9874;\ q_4^* = 0{,}0126.$$

Граничные значения информационной энтропии:

для 2-го потребителя:

$$H^*(p_2^*) = -p_2^* \log_2 p_2^* = -0{,}9885 \log_2 0{,}9885 = 0{,}0165,$$

$$H^*(q_2^*) = -q_2^* \log_2 q_2^* = -0{,}0115 \log_2 0{,}0115 = 0{,}106.$$

для 3-го потребителя:

$$H^*(p_3^*) = 0{,}0204,\ H^*(q_3^*) = 0{,}1255;$$

для 4-го потребителя:

$$H^*(p_4^*) = 0{,}01806,\ H^*(q_4^*) = 0{,}1139.$$

Учитывая, что в реальных распределительных сетях элементы соединены последовательно, вероятность безотказной работы участка сети представляет собой произведение вероятностей отдельных элементов и свойство энтропии

$$H(ab) = H(a) + H(b)$$

получаем:

для 2-го потребителя:

$$H(p_{ИП-2}) = 0{,}00346,\ H(q_{ИП-2}) = 0{,}02089.$$

для 3-го потребителя:

$$H(p_{ИП-1-3}) = p_1 H(p_3) + p_3 H(p_1) = 0{,}0109;$$
$$H(q_{ИП-1-3}) = H(q_1) + H(q_3) + q_1 H(p_3) + q_3 H(p_1) = 0{,}08011.$$

для 4-го потребителя:

$$H(p_{ИП-1-4}) = p_1 H(p_4) + p_4 H(p_1) = 0{,}01347;$$
$$H(q_{ИП-1-4}) = H(q_1) + H(q_4) + q_1 H(p_4) + q_4 H(p_1) = 0{,}0719.$$

Проведем анализ полученных результатов, сравнив полученные значениями с граничными условиями. Для надежного функционирования участка распределительной сети необходимо выполнение условий:

$$H(p_{ИП-2}) \le H^*(p_{ИП-2}),$$
$$H(q_{ИП-2}) \le H^*(q_{ИП-2}),$$
$$H(p_{ИП-1-3}) \le H^*(p_{ИП-1-3}),$$
$$H(q_{ИП-1-3}) \le H^*(q_{ИП-1-3}),$$
$$H(p_{ИП-1-4}) \le H^*(p_{ИП-1-4}),$$
$$H(q_{ИП-1-4}) \le H^*(q_{ИП-1-4}).$$

Для потребителей 2, 3 и 4 все условия выполняются, следовательно, рассматриваемую распределительную систему можно считать надежной при заданных начальных условиях. Однако вычисленные значения энтропии обладают полезным свойством: чем выше значение энтропии, тем больше элемент системы подвержен отказам.

Проанализируем участки распределительной сети. Суммарная информационная энтропия равна

$$H_\Sigma(p) = H(p_1) + H(p_2) + H(p_3) + H(p_4) = 0{,}018641;$$
$$H_\Sigma(q) = H(q_1) + H(q_2) + H(q_3) + H(q_4) = 0{,}1254.$$

Вклад участка распределительной сети:

– по вероятности безотказной работы

$$K_{pi} = H(p_i)/H_\Sigma(p).$$

Тогда

$$K_{p1} = 0{,}501,\ K_{p2} = 0{,}185,\ K_{p3} = 0{,}0889,\ K_{p4} = 0{,}224.$$

– по вероятности отказа

$$K_{qi} = H(q_i)/H_\Sigma(q).$$

$$K_{q1} = 0{,}376,\ K_{q2} = 0{,}166,\ K_{q3} = 0{,}261,\ K_{p4} = 0{,}194.$$

Наибольшие значения информационной энтропии имеет 1-й участок распределительной сети – 0,501 и 0,376, следовательно, данный участок в большей степени подвержен отказам в отличии от других участков. Учитывая, что 3-й и 4-й потребители получают электроэнергию через этот участок, то следует уделить особое внимание выбору компонентов этого участка или предусмотреть резервирование.

Заключение

Рассмотренный метод обладает простотой в практическом использовании и может быть легко адаптирован на оценку распределительных сетей более сложной структуры. Реальные распределительные сети имеют резервные элементы, что в значительной степени повышает надежность систем электроснабжения. В оценке таких сетей также может быть использована информационная энтропия. Проведение оценки на ранних стадиях проектирования позволит отклонить заведомо неэффективные участки сети и сократить временные и материальные затраты на проектирование.

Список источников

1. *Блинова И. В., Попов И. Ю.* Теория информации: учеб. пособие. СПб.: ИТМО, 2018. 84 с.

2. *Дулесов А. С., Семенова М. Ю., Хрусталев В. И.* Свойства энтропиии технической системы // Фундаментальные исследования. 2011. № 8–3. С. 631–636.

3. *Дулесов А. С., Карандеев Д. Ю., Дулесова Н. В.* Оптимальное резервирование радиальных распределительных сетей по критериям надежности и информационной неопределенности // IEEE 3nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. P. 1–4.

4. *Карандеев Д. Ю.* Учет количества информации в задачах построения оптимальных структур распределительных сетей с резервированием // Вестник Хакасского государственного университета им. Н. Ф. Катанова. 2017. № 20. С. 16–19.

5. ПУЭ 7. URL: pue.pdf (en-res.ru) (дата обращения: 12.01.2023).

ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 62.53 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-379-382**

Ю. А. Ганьшин*
кандидат технических наук, доцент
С. О. Жеребко*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МОНИТОР ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА БАЗЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ КАМЕР В ЭКСПЕРИМЕНТЕ «ПРОТОН»

Описана работа монитора положения пучка, расположенного за основным детектором, что является частью экспериментального метода рассеяния частиц, для дальнейшего опровержения расхождения в измерении зарядового радиуса протона.
Ключевые слова: *трековые детекторы, пропорциональная камера, радиус протона, Майнцский ускоритель электронов, проект «Протон».*

Y. A. Ganshin*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
S. O. Zherebko*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ELECTRON BEAM MONITOR BASED ON PROPORTIONAL CAMERAS IN THE EXPERIMENT «PROTON»

The work of the position monitors of the beam located behind the main detector, which is part of the experimental method of particle scattering, is described to further refute the discrepancy in the measurement of the charge radius of the proton.
Keywords: *Track detectors, proportional chamber, proton radius, Mainz electron accelerator, Proton project.*

Протон является одним из основных элементов материи. Точное определение его характеристик – одна из ключевых задач в области адронной физики. Зарядовый радиус протона, то есть распределение плотности заряда в пространстве стоит в ряду наиболее важных параметров, который должен быть точно измерен в эксперименте.

На данный момент существует значительное (4,5 %) расхождение в результатах измерения зарядового радиуса протона, полученных в опытах по упругому электрон-протонному рассеянию и в экспериментах с мюонными атомами. Предыдущие данные по ep-рассеянию были получены в экспериментах, в которых детектировался только рассеянный электрон. В 2015 году группа сотрудников ПИЯФ под руководством профессора А. А. Воробьева предложила новый экспериментальный метод исследования малоуглового ep-рассеяния, в котором детектируются обе частицы в конечном состоянии – электрон и протон отдачи. Метод обладает рядом преимуществ, позволяющих планировать прецизионное измерение дифференциального ep-сечения в области малых переданных импульсов, причем впервые будет измерена его абсолютная величина. Также достоинством метода является относительно малая величина радиационных поправок к измеренному дифференциальному ep-сечению [1], [2].

Набор основного массива экспериментальных данных будет производиться на уникальном по интенсивности и другим характеристикам пучке электронов с энергией 720 МэВ ускорителя MAMI Института ядерной физики Университета г. Майнц, Германия.

MAMI – это так называемый ускоритель непрерывных пучков. Таким образом, электронный луч не является макроскопически импульсным, как в некоторых других ускорите-

лях; скорее, структура времени луча настолько мала (0,4 нс), что детекторы не могут регистрировать его, и, таким образом, луч действует как непрерывный постоянный ток. Это имеет большое преимущество в том, что количество собираемых экспериментальных данных распределяется равномерно, а не концентрируется в коротких импульсах. Ускоритель генерирует четко определенный луч: диаметр луча составляет несколько 0,1 мм; размытие энергии при 855 МэВ меньше 13 кэВ. Таким образом, энергия электронов рассеивается только примерно на одну сотую тысячную от заданного значения. Кроме того, положение луча поддерживается постоянным на уровне менее 200 мкм с помощью сложных механизмов регулирования [3].

Программным Комитетом (PAC) это предложение одобрено с высшим приоритетом. Основной целью эксперимента является измерение зарядового радиуса протона с субпроцентной точностью.

Параметры пучка представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры электронного пучка

Энергия пучка	720 МэВ
Энергетическое разрешение пучка	<20кэВ (1σ)
Абсолютная точность энергии пучка	±150 кэВ (1σ)
Интенсивность пучка (во время сеанса)	2106 e/c
Интенсивность пучка (калибровка)	104 e/c и 103 e/c
Разлет пучка	≤ 0,5 мрад (1σ)
Размер пучка	≤ 0,2 мм (1σ)
Загрузка	100 %

В ускорителях частиц электрически заряженные частицы ускоряются с помощью электрических и магнитных полей. Самый простой принцип – использовать высокое напряжение постоянного тока, в электрическом поле которого частицы ускоряются. Однако выше нескольких 100 кВ вероятность образования дуг резко возрастает, поэтому достижимая энергия ограничена. Поэтому для более высоких энергий используется принцип линейного ускорителя, в котором электроны ускоряются в высокочастотных электрических полях микроволнового излучения. Это позволяет достичь энергий, для которых электрон должен был бы пройти несколько мВ напряжения.

Для отладки этой части детектора и измерения точности монитора пучка была собрана установка, состоящая из пропорциональных камер и коллимированного источника ^{90}Sr (β-545.9 кэВ) на перемещающем устройстве. Интенсивность пучка электронов от источника по порядку величины совпадает с ожидаемой интенсивностью пучка в эксперименте.

Сигналы с одной камеры поступают на отдельно стоящий 9-канальный усилитель микротоков, и после преобразования и усиления оцифровываются контроллером DAQ32. Программа на компьютере каждые 300–500 мс считывает все 32 канала с контроллера DAQ32 и записывает в файл. Программа на компьютере каждые 300–500 мс считывает все 32 канала с контроллера DAQ32 и записывает в файл. Одновременно с этим 8 каналов камеры отображаются в виде гистограммы для проверки и настройки прибора. Далее накопленные файлы обрабатывались отдельной программой offline.

В качестве алгоритмов обработки сигналов проверены следующие кандидаты:

– *фитирование гауссианой*. Требует сравнительно большой вычислительной мощности;

– *усреднение*. Самый простой алгоритм, однако может давать ошибку из-за обрезания профиля пучка по координате;

– *аналитическое вписывание параболы в верхние три точки пика*. Простой алгоритм.

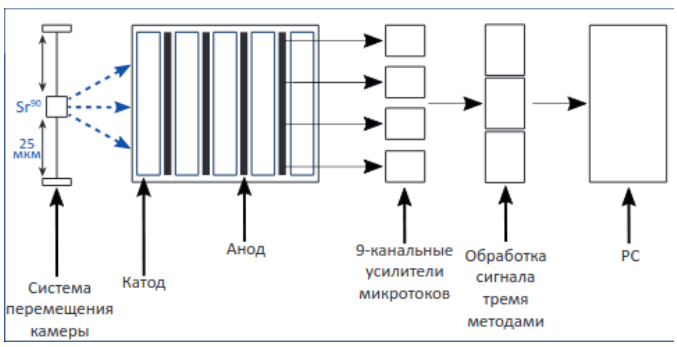


Рис. 1. Схема тестовых испытаний монитора пучка

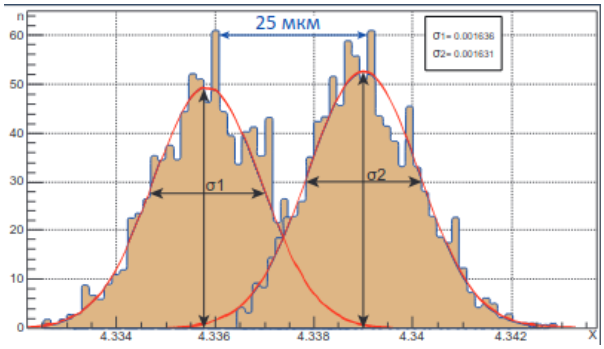


Рис. 2. Распределение координаты пучка при фитировании сигнала гауссианой и при усреднении сигнала

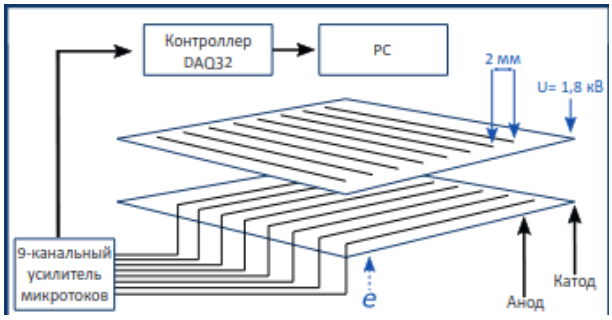


Рис. 3. Схема пропорциональной камеры

Характерные распределения координаты пучка при фитировании сигнала гауссианой и при усреднении сигнала показаны на рис. 2 соответственно.

Видно, что для измеренных сигналов усреднение и фитирование гауссом дает примерно одинаковую ширину распределения координаты: около 3,2 мкм. При этом есть отличие в средней величине распределения. Вероятно, это связано с обрезанием профиля пучка, что существенно влияет на усреднение. Тем не менее этот метод фитирования функцией Гаусса рассматриваться в качестве кандидата.

Управление пучком в эксперименте будет осуществляться на основе монитора положения пучка, расположенного за основным детектором. Монитор состоит из четырех пропорциональных камер (две плоскости X и две – Y). Апертура камер выбрана равной 40 × 40 мм^2, чтобы пучок проходил через камеры с минимальными искажениями. На камеры подавалось высокое напряжение –1,8 кВ и использовалась газовая смесь Ar+30 %CO_2.

Для проверки всех плоскостей пропорциональной камеры собран полный комплект усилителей. Все каналы усилителей были прокалиброваны. В каждом канале измерено смещение при отсутствии высокого напряжения и максимальная амплитуда сигнала от радиоактивного источника. Калибровки использованы при обработке сигналов. Камера монитора пучка с полным комплектом усилителей.

В такой конфигурации был проведен ряд измерений со сканированием по одной из координат (X или Y). Из-за небольшой энергии источника ширина профиля пучка изменяется от 3,7 мм для ближней к источнику плоскости до 8,7 мм для дальней от источника плоскости. Это влияет на аналитическое вписывание параболы, которое дает большую ошибку для широких сигналов. С этим связаны большие вертикальные ошибки измеренных координат для плоскости, наиболее удаленной от источника [5].

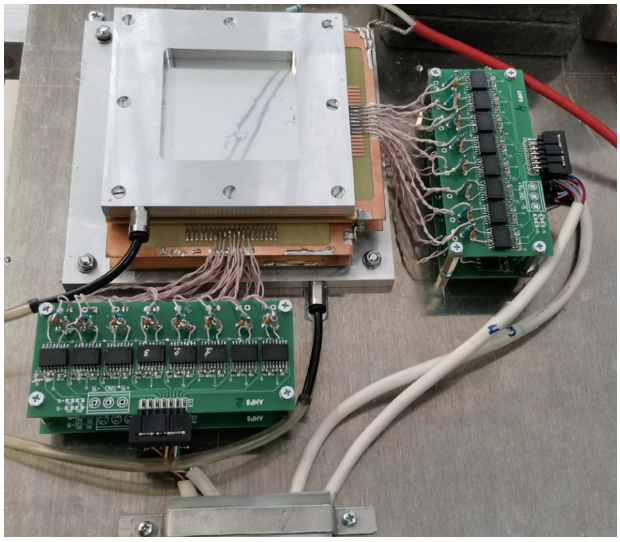


Рис. 4. Камера монитора пучка с полным комплектом усилителей

Для отладки этой части детектора и измерения точности монитора пучка была собрана установка, состоящая из пропорциональных камер и коллимированного источника 90Sr (β-545.9 кэВ) на перемещающем устройстве (цена деления 25 мкм).

Калибровочная зависимость снималась с помощью перемещения источника микрометрическим винтом (цена деления 25 мкм). Сигнал с камеры измерялся в диапазоне 10 мм через каждые 0,25 мм. В каждой точке накоплено 1000 сигналов. Каждая точка калибровочной зависимости отображается с погрешностями: по оси Y – стандартное отклонение из гистограммы распределения координаты, по оси X – половина деления микрометра (12,5 мкм). Сплошной линией показан линейный фит полученных точек. На нижнем графике показана невязка (отклонение от фита).

На рис. 5 показано сравнение калибровочных прямых для всех трех методов обработки сигнала. Видно, что фитирование гауссом дает наилучшую точность и может использоваться для определения абсолютной координаты пучка. Усреднение сигнала дает похожую относительную точность, но координата, полученная этим методом, сильно отличается от заданного положения источника. Таким образом, этот метод можно использовать для быстрого расчета сигнала обратной связи для управления пучком, но он не годится для определения абсолютной координаты пучка.

Для проверки чувствительности измерений координаты пучка были измерены четыре точки в районе центра камеры с шагом 25 мкм. Ре-

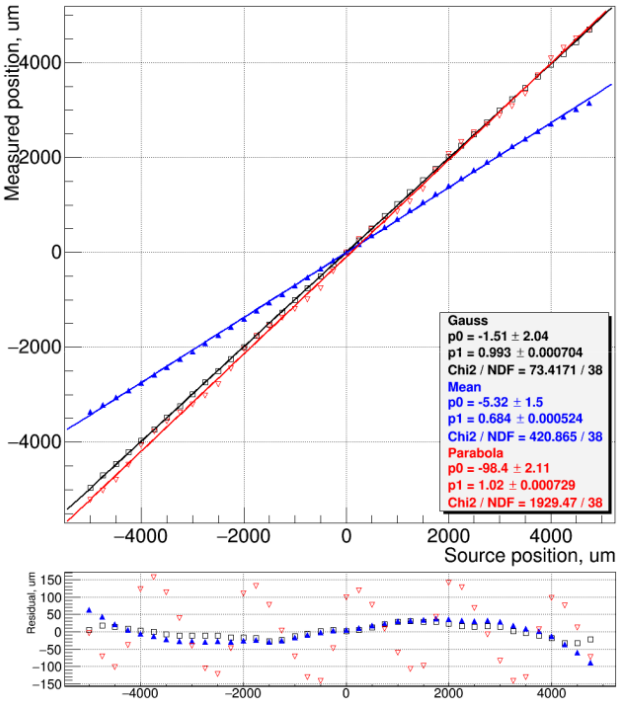


Рис. 5. Сравнение калибровок трех методов

зультаты позволяют утверждать, что чувствительности измерений достаточно, чтобы получать адекватный сигнал обратной связи при отклонении пучка на несколько микрометров. Каждая точка отображается с погрешностями: по оси Y – стандартное отклонение из гистограммы распределения координаты, по оси X – половина деления микрометра (12,5 мкм) отклонении пучка на несколько микрометров. Каждая точка отображается с погрешностями: по оси Y – стандартное отклонение из гистограммы распределения координаты, по оси X – половина деления микрометра (12,5 мкм) [5].

В результате тестовых испытаний было установлено, что монитор позволяет определить абсолютное положение максимума интенсивности сигнала, а, следовательно, тестового источника или электронного пучка, с погрешностью в 70 мкм. Чувствительность относительных измерений координаты пучка не превышает 20 мкм. Такая точность соответствует требованиям эксперимента PRES.

Список источников

1. *Andreev V.* Phys. Rev. Lett. 110, 022504 (2013).

2. *Dobrovolsky A.* Nucl. Phys. A 766, 1 (2006).

3. *Ganshin Y., Zherebko S.* ZAVALISHINSKY READINGS'22. 2022. P. 140.

4. *Ahmed S.* Physics & Engineering of Radiation Detection / Academic Press is an imprint of Elsevier. 2007. P. 168–182, 978-0-12-045581-2.

5. *Бочин Б. В., Грачев В. Т., Кравцов П. А.* Пропорциональная камера для настройки пучка. 2021. P. 1–22.

УДК 533.9, 621.039.6 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-383-385**

В. В. Кузенов*
доктор физико-математических наук, профессор
Е. А. Воронина*
студентка
С. В. Рыжков*
доктор физико-математических наук, профессор
**Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана*

МАГНИТНО-ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ И МОЩНЫЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Проведен обзор по теоретическим и экспериментальным исследованиям в области сжатия и нагрева плазменной мишени во внешнем магнитном поле, которая в последнее время получила название магнитно-инерциального термоядерного синтеза (МИТС). Представлен анализ современного состояния работ по имплозии замагниченных мишеней и влиянию внешнего магнитного поля на основные параметры плазмы и характеристики системы. Затронуты вопросы численного моделирования экспериментов магнитно-инерциального удержания плазмы. Особое внимание уделено двум перспективным направлениям МИТС – с плазменными пушками (плазменные струи) и с лазерным драйвером (лазерные пучки).
Ключевые слова: *высокотемпературная плазма, магнитное поле, магнитно-инерционное удержание, замагниченная мишень, источник нейтронов.*

V. V. Kuzenov*
Dr. Sc. Phys.-Math., Professor
E. A. Voronina*
Student
S. V. Ryzhkov*
Dr. Sc. Phys.-Math., Professor
**Bauman Moscow State Technical University*

MAGNETIC-INERTIAL THERMONUCLEAR FUSION AND POWERFUL ELECTROPHYSICAL INSTALLATIONS

A review of theoretical and experimental studies in the field of compression and heating of a plasma target in an external magnetic field, which has recently been called magnetic-inertial thermonuclear fusion (MITS), has been carried out. An analysis of the current state of work on the implosion of magnetized targets and the effect of an external magnetic field on the main plasma parameters and system characteristics is presented. Questions of numerical simulation of experiments on magnetic-inertial confinement of plasma are touched upon. Particular attention is paid to two promising areas of MITS – with plasma guns (plasma jets) and with a laser driver (laser beams).
Keywords: *magnetoplasma compressor, mathematical model, magnetic field, plasma dynamics.*

В настоящее время термоядерные исследования интенсивно развиваются в ведущих странах. Яркий пример этого – разработка и строительство международного термоядерного экспериментального реактора ITER. Лидером среди магнитных ловушек для удержания плазмы являются токамаки. Альтернативные магнитные конфигурации по уровню исследований отстают на несколько лет, но их потенциальные возможности не исключают применения в будущем. В связи с этим актуальными становятся вопросы, связанные с разработкой концепции, как термоядерного реактора для промышленного производства энергии, так и термоядерных установок для производства медицинских изотопов, генерации нейтронов и создания ракетных двигателей.

Данный обзор направлен на обоснование потенциальных возможностей применения магнитно-инерциальных термоядерных систем (МИТС) [1]–[5]. Такие исследования являются актуальными, так как расширяют круг возможных путей развития будущей термоядерной энергетики.

Основная проблема МИТС связана с наличием примесей, однако использование сфериче-

ски сходящихся плазменных струй для создания плазменного лайнера позволяет решить проблему необходимости уничтожения материала твердого лайнера после каждого выстрела. Поэтому представляют интерес лайнерные системы и лазерный драйвер.

Исследования были начаты и проводятся в России, США и Японии, но многие разработки были выполнены впервые именно в СССР и РФ, в частности, квазисферическая система «двойной лайнер» предложена в Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова (НИЦ «Курчатовский институт»), а пионером в исследованиях компактного тора по праву считается ТРИНИТИ [6]. Основным отличием отечественного направления исследований является то, что в США и Японии осуществлены схемные решения (концептуальные проекты) термоядерного реактора, в России – плазмофизический анализ, определяющий условия зажигания реакции и наиболее экономичные и эффективные режимы.

Исследования и разработки в области управляемого термоядерного синтеза включены в комплексную программу «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации» [7]. Данная тематика соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники Российской Федерации «Энергетика и энергосбережение» и основному направлению технологической модернизации экономики России «Эффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива».

Магнитно-инерциальный термоядерный синтез – оригинальное направление инерциального термоядерного синтеза, основанное на магнитно-инерционном удержании горячей плазмы [8]–[13]. МИТС объединяет все концепции, включая магнитное обжатие [14], [15] пинчи [16]–[18] и комбинированные системы [19]–[21]. Специфика МИТС заключается в том, что в этом подходе требуется оболочка (лайнер) [22] для сжатия и нагрева замагниченной плазмы (мишени), например, компактного тора [23]. В условиях МИТС возможно формирование плазмы с высокой плотностью энергии [24]. В [25] показано, что поджиг термоядерного топлива значительно упрощается в случае с замагниченной плазмой.

Магнитно-инерциальный термоядерный синтез с лазерным драйвером (МИТС *ЛД или* LD MIF – Laser-driven magneto-inertial fusion) представляет собой широкий круг установок, в которых лазерные системы используются для предварительного разогрева мишени мощными лазерными пучками и/или сжатия лазерами с высокой энергией импульса мишенной плазмы, находящейся в предварительно сгенерированном (внешнем) магнитном поле.

Магнитно-инерциальный синтез с плазменными струями (PJMIF) – это единственный вариант магнитно-инерциального синтеза, который имеет уникальное сочетание дистанционной имплозии и высокой скорости имплозии (от 50 до 150 км/с). Он использует недорогие плазменные пушки для формирования и имплозии плазмы и имеет потенциал для относительно высокой частоты повторения от 1 до 2 Гц. Его конфигурация совместима с использованием толстой жидкой стенки, которая одновременно служит воспроизводящим тритий бланкетом, а также теплоносителем для отвода тепла из термоядерного реактора. Пространство рабочих параметров PJMIF допускает возможность использования достаточно плотной плазмы мишени, чтобы плазма мишени имела высокое значение. Если бы такая плазма могла быть реализована, это помогло бы подавить микро- и магнитогидродинамические неустойчивости, придав плазме-мишени классические характеристики переноса и удержания энергии. Его открытая геометрия и умеренные временные и пространственные масштабы обеспечивают удобный доступ к диагностике. Доступность диагностики, высокая частота импульсов и низкая стоимость сеанса должны обеспечить быстрое решение технических проблем во время разработки, таким образом, потенциал для быстрого исследования и разработки PJMIF. Однако у PJMIF есть ряд проблем, в том числе нахождение на очень ранней стадии разработки, разработка необходимых плазменных пушек, работа с потенциальными неоднородностями гильзы, очистка камеры от остаточного газа с высоким Z между выстрелами и разработка повторяющихся импульсных технологии силовых компонентов.

Результаты теоретического исследования получены в рамках выполнения программы «Приоритет-2030» и федерального проекта Минобрнауки России «Передовые инженерные школы» (*ПИШ*).

Список источников

1. *Гаранин С. Г., Ивановский А. В., Куликов С. М.* Инерционный термоядерный синтез с применением взрывомагнитных генераторов // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 131–140.

2. *Wurden G.* Magneto-Inertial Fusion // Fusion Energy. 2016. Vol. 35. P. 69–77.

3. *Kuzenov V., Ryzhkov S., Frolko P.* Numerical simulation of the coaxial magneto-plasma accelerator and non-axisymmetric radio frequency discharge // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 830. P. 012049.

4. *Kuzenov V., Ryzhkov S., Starostin A.* Development of a Mathematical Model and the Numerical Solution Method in a Combined Impact Scheme for MIF Target // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. 2020. Vol. 16. N 2. P. 325–341.

5. *Kuzenov V., Ryzhkov S.* Thermophysical Parameter Estimation of a Neutron Source Based on the Action of Broadband Radiation on a Cylindrical Target // Fusion Science and Technology. 2022. Vol. 78.

6. *Гасилов В. А., Захаров С. В., Смирнов В. П.* О генерации мощных потоков излучения и получении мегабарных давлений в лайнерных системах // Письма в ЖЭТФ. 1991. Т. 53. № 2. С. 83–86.

7. Указ Президента Российской Федерации от 16.04.2020. № 270 «О развитии техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации».

8. *Kuzenov V., Ryzhkov S.* Calculation of plasma dynamic parameters of the magneto-inertial fusion target with combined exposure // Physics of Plasmas. 2019. Vol. 26. P. 092704.

9. *Kuzenov V., Ryzhkov S.* Estimation of the neutron generation in the combined magneto-inertial fusion scheme // Physica Scripta. 2021. Vol. 96. P. 125613.

10. *Рыжков С. В.* Известия РАН. Сер. Физическая. 2014. Т. 78. № 5. С. 647–653.

11. *Ryzhkov S., Chirkov A.* Alternative Fusion Fuels and Systems. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018.

12. *Lindemuth I., Kirkpatrick R.* Parameter space for magnetized fuel targets in inertial confinement fusion // Nuclear Fusion. 1983. Vol. 23. P. 263–284.

13. *Hasegawa A.* Magnetically insulated inertial fusion: a new approach to controlled thermonuclear fusion // Physical Review Letters. 1986. Vol. 56. N 2. P. 139–142.

14. *Гаранин С. Ф.* Физические процессы в системах МАГО-MTF. Саров, 2012.

15. *Азизов Э. А.* Проект «БАЙКАЛ» – отработка схемы генерации электрического импульса // Вопросы атомной науки и техники. Термоядерный синтез. 2001. № 3. С. 3–17.

16. *Тэрки П.* Термоядерные системы на основе θ-пинчей со сжимающимся лайнером // Прикладная механика и техническая физика. 1975. Т. 4. С. 32–44.

17. *Алиханов С. Г., Бахтин В. П.* Использование m-0 неустойчивости зет-пинч-лайнера для трехмерного сжатия плазмы // Доклады АН СССР. 1982. Т. 263. № 2. С. 332–324.

18. *Александров В. В.* Сжатие квазисферических проволочных лайнеров: эксперименты и численные исследования. М., 2013. 18 с. (Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. № 42).

19. *Ворончев В. Т., Кукулин В. И.* Термоядерный синтез в D3He-плазме на основе пинча с управлением фемтосекундным лазером // Ядерная физика. 2010. Т. 73. № 8. С. 1418–1426.

20. *Кузенов В. В., Рыжков С. В.* Численное моделирование взаимодействия мишени магнитно-инерциального термоядерного синтеза с плазменным и лазерным драйверами // ТВТ. 2021. Т. 59. № 4. С. 492–501.

21. *Ивановский А. В.* Реализация магнитного обжатия в схеме обратного пинча, запитываемого током ВМГ // ВАНТ. Термоядерный синтез. 2004. Вып. 3. С. 37–41.

22. *Азизов Э. А.* Удержание плазмы взрывающимся лайнером // Доклады АН СССР. 1979. Т. 248. № 5. С. 1090–1092.

23. *Куртмуллаев Р. Х., Семенов В. Н., Хвесюк В. И.* Динамика лайнерных систем // Плазменные ускорители и ионные инжекторы. М.: Наука, 1984. С. 250–263.

24. *Фортов В. Е.* Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе. М.: Физматлит, 2008. 263 с.

25. *Basko M., Кетр А.,* Meyer-ter-Vehn J. Ignition conditions for magnetized target fusion in cylindrical geometry // Nucl. Fusion. 2000. Vol. 40. P. 59–68.

УДК 004.93'1 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-386-390**

Д. В. Леушев*
магистрант
В. В. Булатов*
кандидат технических наук, доцент
В. В. Семенников**
кандидат физико-математических наук, заместитель генерального директора
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
***АО «Прогрессивные технологии»*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ ЛУЧА ЛАЗЕРА ИНКЛИНОМЕТРА ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ, ПОЛУЧЕННОМУ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ МАТРИЦЕЙ

Представлен обзор современных инклинометрических систем. Выявлено, что недостаточно проработана методика оценки угла отклонения с требуемыми метрологическими характеристиками для лазерных инклинометров. На основе выборки изображений, полученных в результате испытаний прототипа лазерного инклинометра, приведена методика оценки смещения луча лазера для определения угла наклона.
Ключевые слова: *лазерный инклинометр, угол наклона, обработка изображений, пороговая фильтрация, оценка точности.*

D. V. Leushev*
Postgraduate Student
V. V. Bulatov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
V. V. Semennikov**
PhD Sc. Phys.-Math., Deputy General Director
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
***JSC Progressive Technologies*

DETERMINATION OF THE INCLINOMETER LASER BEAM SHIFT FROM THE IMAGE CAPTURED BY THE LIGHT-SENSITIVE MATRIX

The article presents an overview of modern inclinometric systems. It was revealed that the methodology for estimating the angle of deviation with the required metrological characteristics for laser inclinometers has not been sufficiently developed. Based on a sample of images obtained as a result of testing a prototype laser inclinometer, a method for estimating the displacement of a laser beam to determine the angle of inclination is given.
Keywords: *laser inclinometer, tilt angle, image processing, threshold filtering, accuracy estimation.*

В настоящее время наблюдается повышение требований к безопасности различных объектов, конструкций и сооружений. Особое внимание уделяется разработке методов контроля положения объектов и углов наклона конструкций. Для измерения углов наклона применяются приборы, которые называются инклинометры. Инклинометрические системы находят применение в различных отраслях промышленности (рис. 1) [1].

Помимо этого, следует обратить внимание на ряд статей [2]–[4], в которых поднимается вопрос о метрологической точности оценки значений, получаемых при инклинометрии в процессе бурения скважин, подземной навигации, контроле угла отклонений от горизонтали строительных конструкций.

Однако до сих пор не проработана методика оценки угла отклонения с требуемыми метрологическими характеристиками для лазерных инклинометров.

Исходя из этого, задачу исследований можно определить как разработку методики оценки смещения луча лазера инклинометра на основе дифракционной картины, получаемой при отражении от поверхности жидкости.

На рис. 2 представлена схема лазерного инклинометра согласно патенту РФ193722U1 от 19.06.2019 [5].

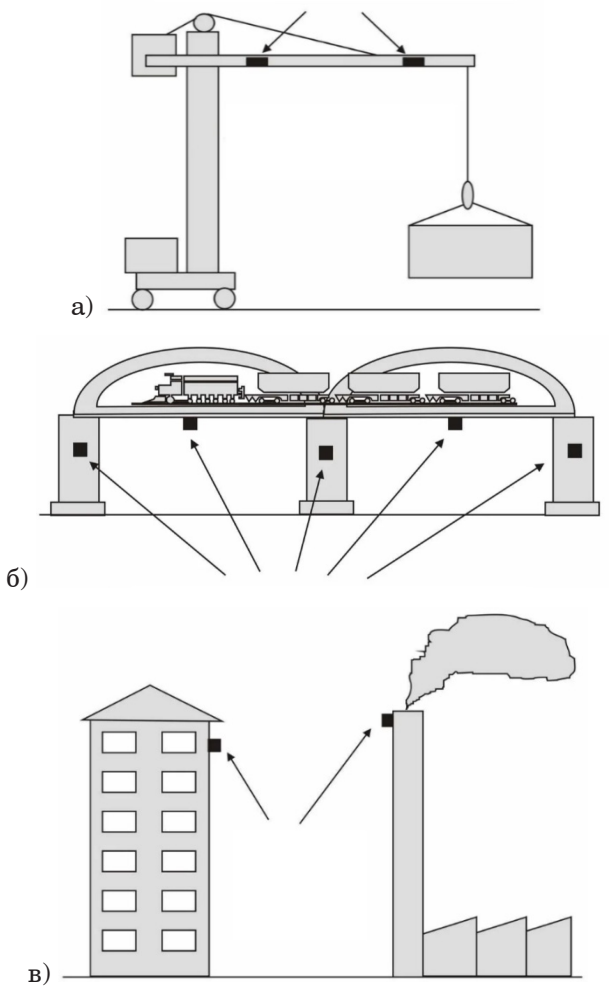


Рис. 1. Применение инклинометров: а) – контроль и измерение рабочего и остаточного прогиба стрелы башенного крана; б) – контроль и измерение статических и динамических параметров мостов, железнодорожных или автомобильных опор, газопроводов, нефтепроводов; в) – контроль и измерение статических характеристик строительных объектов

Корпус 1 выполнен в форме прямоугольного параллелепипеда. Для опытного образца используется рамный уровень. Луч I одномодового лазера 2 проходит через кольцевую диафрагму 3 и попадает на полупрозрачное зеркало 5. Далее луч отклоняется на 90 градусов и попадает на поверхность жидкого металла 4. Отраженный обратно луч II проходит через полупрозрачное зеркало и попадает на светочувствительную двумерную матрицу 6. При отклонении опорной поверхности корпуса 1 от горизонтальной плоскости по любой оси происходит смещение центра изображения на светочувствительной матрице.

Для реализации поставленной задачи ниже приведена методика расчета определения смещения луча лазера на изображении.

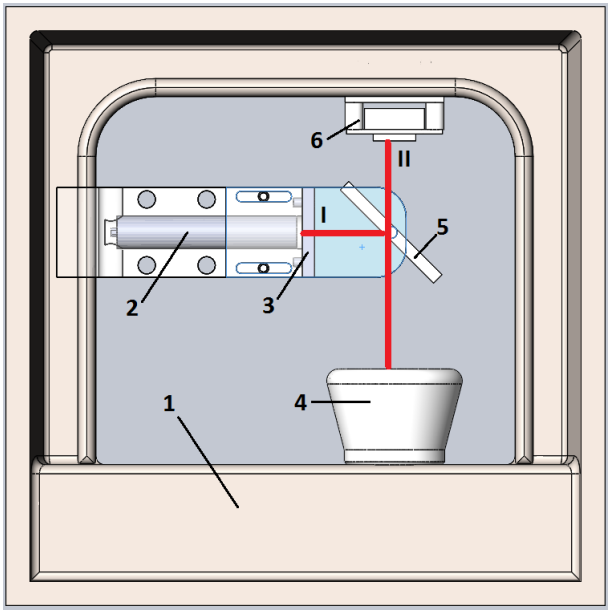


Рис. 2. Макет лазерного инклинометра

Блок-схема алгоритма программы определения смещения центра луча лазера представлена на рис. 3. Осуществим реализацию задачи поиска смещения на языке Python.

Исходное изображение, полученное инклинометром, представлено на рис. 4.

Для преобразования в оттенки серого воспользуемся функцией cv2.cvtColor [6]. Результат преобразования представлен на рис. 5.

С помощью функции cv2.threshold() [6] преобразуем монохромное изображение в бинарное. После анализа значений яркости пикселей изображения получено поровое значение равное 230:

$0<230<1$.

Результат бинаризации согласно выбранному пороговому значению представлен на рис. 6.

Для устранения областей изображения, не являющихся контуром искомой окружности, требуется произвести фильтрацию бинарного изображения.

Воспользовавшись методом PIL.filter() [7], передавая в качестве аргумента ImageFilter. MinFilter (3), произведем фильтрацию. Этот фильтр заменяет значение пикселя минимальным значением из девяти пикселей в массиве 3 x 3. В бинарном изображении это означает, что пиксель будет иметь нулевое значение, если любой из его соседних пикселей равен нулю. После проведения 40 циклов фильтрации получим следующее изображение (рис. 7).

Для реализации поиска смещения были использованы библиотеки обработки изображений OpenCV, PIL, numpy, array и др.

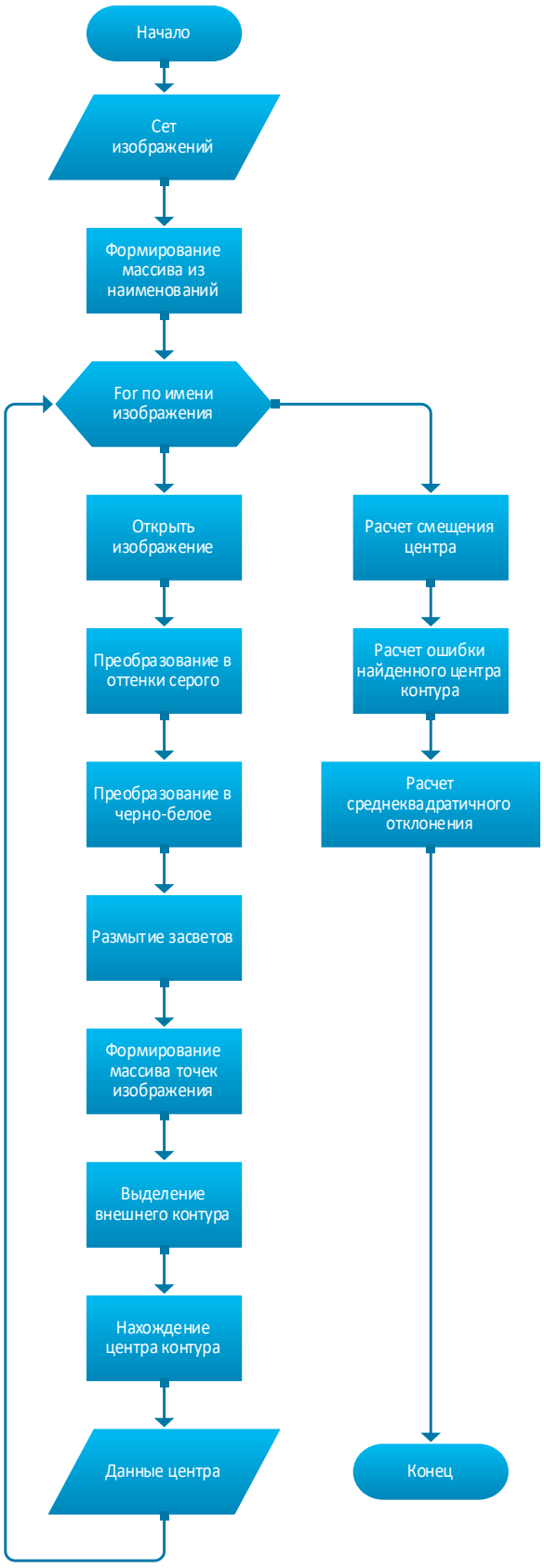


Рис. 3. Блок-схема алгоритма определения смещения центра луча лазера

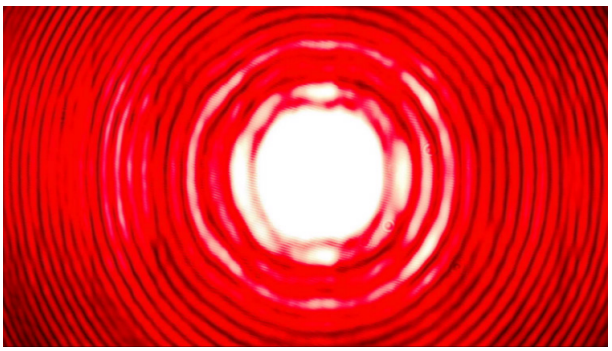


Рис. 4. Исходное изображение

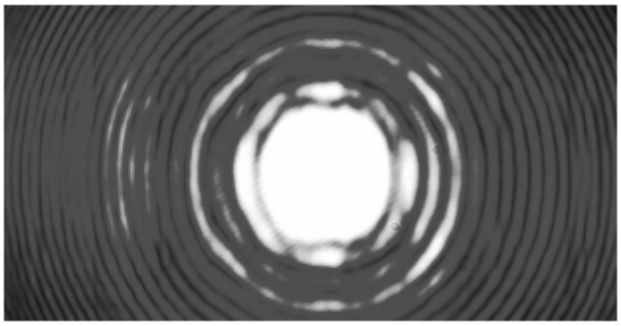


Рис. 5. Преобразование изображения в оттенки серого

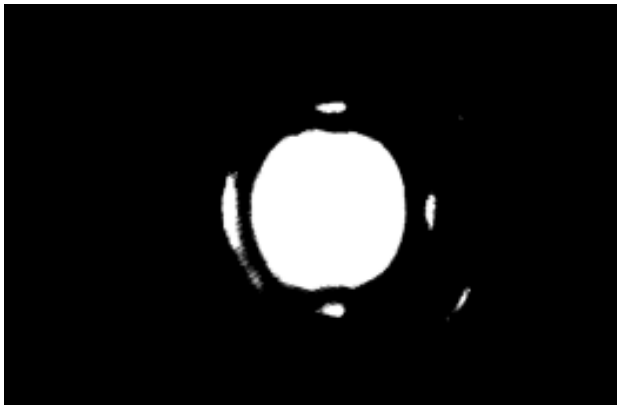


Рис. 6. Бинаризация изображения

Рис. 7. Отфильтрованное бинарное изображение

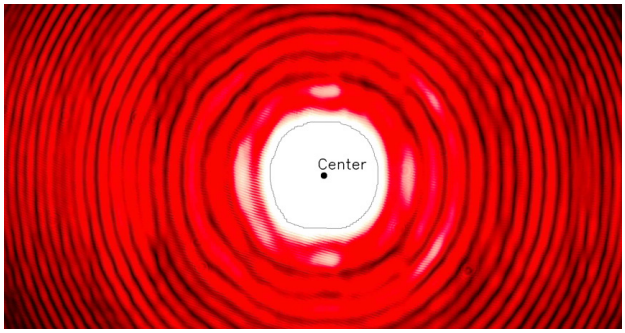


Рис. 8. Найденный центр окружности

После обработки изображения определяем центр смещения луча, который показан на рис. 8.

Зная реальное смещение центра луча лазера и полученные расчетные значения, можно провести анализ выборки изображений и оценить ошибку вычислений.

Произведем анализ полученных расчетов.

Усредненный коэффициент преобразования в микрометры определим как

$$\overline{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{x_{\text{p}i}}{x_{\text{с}} - x_{\text{ц}}}}{n},$$

где $x_{\text{p}i}$ – реальное смещение центра луча лазера, мкм; $x_{\text{смещ}i}$ – расчетное смещение центра луча лазера, пиксель; $x_{\text{ц}}$ – центр изображения, пиксель; n – объем выборки.

Определим усредненный коэффициент преобразования через функцию Python average():

```
k_offset_cx.append(real_exemple[i]/(cx[i] – cx[0]))
k_medium_cx = numpy.average(k_offset_cx)*10
print(k_medium_cx)
```

Получаем значение коэффициента, равное 2, 8848 мкм/пиксель.

Получив значения коэффициента преобразования, переведем значения смещения центра в мкм и запишем результаты в табл. 1.

Зная реальное смещение центра и значение, полученное при помощи расчетов, можно найти ошибку вычислений и среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - x_{\text{ср}})^2}{n-1}},$$

где x_i – разница между расчетным смещением центра луча лазера и реальным, мкм; $x_{\text{ср}}$ – среднеарифметическое значение, мкм; n – объем выборки.

Таблица 1

№ изображения	Расчетное значение смещения центра луча, мкм	Реальное смещение центра луча, мкм	Δ, мкм
1	14,40281	10	4,402812
2	23,0445	20	3,0445
3	34,56675	30	4,56675
4	43,20844	40	3,208437
5	51,85012	50	1,850124
6	63,37237	60	3,372374
7	74,89462	70	4,894624
8	80,65575	80	0,655749
9	92,178	90	2,177999
10	103,7002	100	3,700249
11	152,6698	150	2,669811
12	204,5199	200	4,519935
13	253,4895	250	3,489498
14	302,4591	300	2,45906
15	348,5481	350	–1,45194
16	400,3982	400	0,398184
17	501,2179	500	1,21787
18	599,157	600	–0,84301
19	699,9767	700	–0,02332
20	797,9158	800	–2,0842
21	996,6746	1000	–3,32538

Определим среднеквадратичное отклонение с помощью Python:

```
err_x = []
a = 0
for a in range(1, i):
 X = offset_cx[a]*k_medium_cx) – (real_exemple[a]*10)
 err_x.append(X)
S = numpy.std(S)
print(S)
```

Получаем среднеквадратичное отклонение равное 1,546 мкм.

Выводы

Полученное значение среднеквадратичного отклонения отображает погрешность расчетов методики оценки. Согласно патенту РФ193722U1, данная модель может предоставлять точность измерений до 0,25 мкм/м, что в 6 раз меньше полученного результата.

Для улучшения показателей необходимо произвести конструктивные изменения полезной модели и по полученной новой выборке повторно оценить точность измерений.

Список источников

1. Что такое инклинометр? URL: https://dzen.ru/media/rospribor/chto-takoe-inklinometr–5f61ef59ed6f274fbf453925 (дата обращения 10.01.2022).

2. *Карпов В. А., Ростокина О. М., Карпов А. В.* Анализ инструментальной погрешности двухосевого электролитического инклинометра // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. 2017. № 1. С. 76–80.

3. К вопросу о повышении точности инклинометрии в процессе бурения нефтегазовых скважин / В. К. Теплухин, В. В. Зенков, А. Н. Ратушняк, С. В. Байдиков // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2021. № 6. С. 32–41.

4. *Воробьев А. В., Шакирова Г. Р., Иванова Г. А.* Исследование и анализ естественных факторов, воздействующих на метрологические характеристики магнитометрических инклинометров // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2015. № 1. С. 107–115.

5. Лазерный инклинометр. URL: https:/yandex.ru/patents/doc/RU193722U1_20191111 (дата обращения 10.01.2022).

6. OpenCV-Python Tutorials. URL: https://docs.opencv.org/4.x/d6/d00/tutorial_py_root.html (дата обращения 10.01.2022).

7. Pillow (PIL Fork) 9.4.0 documentation. URL: https://pillow.readthedocs.io/en/stable/ (дата обращения 10.01.2022).

УДК 533.9.07 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-391-395**

А. А. Сафронов*
доктор технических наук, заведующий отделением
В. Е. Кузнецов*
кандидат технических наук, заведующий лабораторией
Ю. Д. Дудник*
научный сотрудник
В. Н. Ширяев*
старший научный сотрудник
О. Б. Васильева*
научный сотрудник
**ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН*

ГЕНЕРАТОРЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ: КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ, ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Рассмотрены основные принципы и подходы, заложенные в различные конструкции генераторов низкотемпературной плазмы. Описаны принципы работы, основные преимущества, полученные технические параметры и применение указанных генераторов плазмы в составе широкого круга научно-технических приложений. Затронуты основные моменты физико-технических процессов, сопровождающих горение электрической дуги в камерах генераторов низкотемпературной плазмы. Приведены краткое описание и техническая информация ряда плазмохимических установок, спроектированных и изготовленных в ИЭЭ РАН на базе собственных разработок плазменной техники.
Ключевые слова: *генераторы плазмы, плазменные технологии, электрическая дуга.*

A. A. Safronov*
Dr. Sc. Tech., Department Head
V. E. Kuznetsov*
PhD Sc. Tech., Head of Laboratory
Y. D. Dudnik*
Research Scientist
V. N. Shiryaev*
Senior Research Scientist
O. B. Vasilieva*
Research Scientist
**Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences*

LOW TEMPERATURE PLASMA GENERATORS: DESIGN FEATURES, PHYSICAL PROCESSES, APPLICATIONS

The basic principles and approaches incorporated in various designs of low-temperature plasma generators are considered. The principles of operation, the main advantages, the obtained technical parameters and the use of these plasma generators in a wide range of scientific and technical applications are described. The main points of the physical and technical processes accompanying the burning of an electric arc in the chambers of low-temperature plasma generators are considered. A brief description and technical information of a number of plasma-chemical installations designed and manufactured at the IEE RAS on the basis of its own developments of plasma technology are given.
Keywords: *plasma generators, plasma technologies, electric arc.*

Генераторы низкотемпературной плазмы – это устройства, в которых электрическая энергия преобразуется в тепловую энергию путем выделения джоулева тепла в дуговом разряде. Нагрев газа происходит посредством процессов теплопроводности и конвекции между электрической дугой и газовым потоком. Широкое применение низкотемпературной плазмы и генерирующих ее устройств обусловлено возможностями создания новых плазменных технологий, обладая такими преимуществами, как высокая температура и большая концентрация энергии в малом объеме,

что приводит к увеличению скорости протекания химических реакций. Плазменные технологии способны обеспечивать осуществление процессов с замкнутыми циклами, что создает предпосылки для решения накопившихся проблем в области загрязнения окружающей среды. Расширение использования в промышленности такого рода технологий связано с совершенствованием характеристик генераторов плазмы и электродуговых реакторов, увеличением ресурса непрерывной работы, теплового КПД, использованием газов различного химического состава и обеспечения максимального извлечения целевых продуктов по прошествии химических реакций.

Конструкции генераторов плазмы со стержневыми электродами

В Институте электрофизики и электроэнергетики РАН были разработаны различные типы электродуговых генераторов плазмы переменного тока со стержневыми электродами, они предназначены для работы таких плазменных установок, где необходим невысокий расход рабочего газа и малая мощность.

Генераторы плазмы [1]–[3] способны работать на инертных и восстановительных газах, а также на окислительных средах в диапазоне мощности до 50 кВт, расход плазмообразующего газа достигает 30 г/сек со сроком службы электродов более 200 часов, а КПД ~90 %.

Корпус генератора водоохлаждаемый, выполнен из нержавеющей стали, с разделенными цилиндрическими каналами. В каждом из каналов размещен один стержневой электрод. Рабочий газ поступает в область камеры через кольцевой узел на его наружной поверхности под углом к центральной оси генератора. Стержневой электрод состоит из двух основных элементов: изолятора и наконечника и установлен соосно с каналом. Зазор между стенкой цилиндрического канала и областью наконечника выбирается исходя из условия самостоятельного пробоя, приложенным между электродами напряжением. Электрод выполнен так, что между уплотнительной втулкой и областью максимального диаметра наконечника (в осевом направлении) существует промежуток с меньшим диаметром. Таким образом, при установке в корпусе генератора плазмы, между стенкой канала и электродом образуется кольцевая полость, ограниченная в осевом направлении с одной стороны уплотнительной втулкой изолятора (без зазоров), а с другой стороны – зоной максимального диаметра наконечника (с малым зазором). Эта полость играет роль вихревой камеры, в нее подается рабочий газ из тангенциально просверленного в стенке канала отверстия. Закрученный поток формируется в зоне присоединения наконечника электрода к изолятору, обтекает зону минимального зазора между электродом стенкой канала, и движется в сторону выхода из канала (к соплу генератора плазмы).

Работа генератора плазмы переменного тока со стержневым электродом в цилиндрическом канале основана на следующем принципе: между стенкой канала и наконечником электрода прикладывается высокое переменное напряжение, под его воздействием происходит электрический пробой воздушного промежутка между стенкой каждого канала и буртом наконечника-электрода. Загораются две дуги, которые под воздействием газового потока, подаваемого тангенциально в каналы, выдуваются на торцы электрода и далее, перемещаясь по стенкам каналов, выходят на концы трубок, замыкаются между собой, и дуга начинает гореть от торца одного электрода до торца другого. При изменении полярности дуга вновь инициируется в насыщенном носителями зарядов канале дуги предыдущей части периода, а в случае погасания – опять в зоне минимального зазора между стенкой и наконечником электрода. Закрученный поток рабочего газа стабилизирует дугу в осевой зоне канала, защищая стенки канала от продолжительного жесткого термического воздействия. Рабочий газ нагревается дугой и выходит из сопловой части генератора плазмы.

Такого рода генераторы плазмы установлены в плазмохимическом реакторе для уничтожения жидких и газообразных отходов и плазмохимическом реакторе для уничтожения твердых отходов [7]–[9].

Конструкции генераторов плазмы с рельсовыми электродами

В Институте электрофизики и электроэнергетики РАН разработаны высоковольтные электродуговые генераторы плазмы переменного тока с рельсовыми электродами [4], одним из достоинств которых является достаточно низкий уровень рабочего напряжения на основных электродах. Генераторы этого типа способны работать и с нейтральными (азот, инертные газы), и с окислительными (воздух) средами. Диапазон расхода воздуха до 70 г/с. Мощность, вкладываемую в дуги при этом можно варьировать в диапазоне до 500 кВт.

Генератор плазмы состоит из корпуса, который разделен на две части и предусматривает расстыковку на переднюю часть и заднюю коническую часть, включающую в себя электро-

дный узел. В каждой из частей изготовлено по два контура газовой подачи. Рубашки охлаждения переднего и заднего модулей выполнены раздельно и допускают различные варианты их подключения: либо последовательного – в составе одной системы охлаждения, либо раздельного. Распределение тепловой нагрузки от привязки по длине электрода, при движении дуги дает возможность использовать водоохлаждаемые электроды, выполненные из легкоплавкого материала с высокой теплопроводностью. Ввиду конструктивно разделенной подачи охлаждающей жидкости, возможно раздельное охлаждение камер генератора плазмы с использованием основной и дублирующей систем, что существенно облегчает эксплуатацию генераторов плазмы при их практическом применении, расширяя возможности использования плазмохимических технологий.

Генератор плазмы данного типа обладает существенным эксплуатационным преимуществом, которое заключается в достаточно низкой величине рабочего напряжения, что, с другой стороны, не позволяет осуществить первоначальное инициирование дугового разряда при включении генератора. Поэтому в составе установки имеется дополнительный генератор переменного тока сравнительно небольшой мощности с рабочим напряжением порядка 1000 В [3]. При включении маломощного генератора плазмы появляется плазменный поток с параметрами (концентрация частиц, температура) достаточными для запуска системы и поддержания требуемых параметров горения рабочих дуг. В процессе работы, после зажигания в точке минимального межэлектродного расстояния, основные дуги расширяются в процессе их движения по электродам рельсового типа в электродуговой камере. Это способствует интенсификации процессов теплообмена электрической дуги с рабочим газом, одновременно распределяя тепловую нагрузку по поверхности электрода, что благоприятно сказывается на его долговечности. Все это в своей совокупности (заполнение электродуговой камеры, увеличение ресурса и т. д.) обеспечивает высокую эффективность данного типа генераторов плазмы и позволяет получить значение КПД до 85 %.

В пристеночной зоне, куда подается холодный газ, образуется изолирующий слой, в котором концентрация заряженных частиц резко падает и происходит погасание дуг. Описанный выше процесс непрерывно повторяется, образуя на выходе из сопла генератора плазмы струю низкотемпературной плазмы со среднемассовой температурой порядка (1500–5500) К.

Конструкции генераторов плазмы с кольцевыми электродами

Для использования в составе плазмохимической установки для получения ультрадисперсных порошковых материалов разработаны генераторы плазмы переменного тока с кольцевыми электродами [5], с мощностью до 10 кВт, со среднемассовой температурой плазменной струи до 3500 К при расходе рабочего газа до 1 г/с. Генератор данного типа состоит из трех основных частей: начальный, промежуточный и конечный кольцевые электродов, все электроды выполнены с водяными рубашками охлаждения и с патрубками со штуцерами для подачи плазмообразующего газа, который подается тангенциально. Применяются несколько типов промежуточных электродов: из нержавеющей стали и составной, состоящий из двух частей основной из меди и наружный корпус, формирующий рубашку охлаждения из полиацетали. Минимальная суммарная величина двух зазоров между кольцевыми электродами определяется напряжением холостого хода источника питания. То есть двойной зазор должен надежно пробиваться при приложении напряжения. Следует учитывать, что при нагревании электрода возможно его деформирование и при малом начальном зазоре произойдет короткое замыкание.

Принцип работы генератора плазмы заключается в следующем – при подаче высокого напряжения на начальный и конечный кольцевые электроды происходит пробой двух воздушных промежутков в кольцевом зазоре между начальным электродом и промежуточным электродом и далее между промежуточным электродом и конечным электродом и загорается дуга между начальным и конечным электродами. Перемещение привязки дуги осуществляется под действием тангенциальных газовых потоков, дуга движется по оси канала, вытягивается и замыкается между начальным и конечным электродами генератора плазмы.

Физические процессы в сильноточных дугах

Практическое использование генераторов плазмы переменного тока обусловлено рядом уникальных свойств присущих плазменным системам, которые разрабатываются и создаются в ИЭЭ РАН. Конструктивные и технологические особенности описываемых в данной работе генераторов плазмы обеспечивают быстрый нагрев рабочего газа, ввод высокоэнтальпийного газового потока в плазмохимический реактор и эф-

фективный теплообмен с загруженным для обработки сырьем. При этом состав плазмы (характер рабочего газа) подбирается таким образом, чтобы сформировать наиболее подходящую физико-химическую среду для осуществления технологического процесса. А использование особенностей режимов горения дуг, присущих генераторам плазмы переменного тока, позволяет влиять на важнейшие физические параметры плазмохимического процесса и добиваться стабильности рабочих характеристик в широком диапазоне режимов и высокой надежности всей системы в целом.

В свете указанного характеристики определяющие отличие различных типов горения дуги в генераторах плазмы переменного тока являются важнейшим параметров, требующим внимания и детального изучения для того, чтобы обеспечить возможность наиболее полного раскрытия потенциальных возможностей технологического использования плазменных устройств (генераторов плазмы) переменного тока. Например, изменение пространственных характеристик столба электрической дуги, позволяет увеличить полезную мощность устройства и величину падения напряжения.

В работе генераторов плазмы наблюдаются два характерных режима горения дуг: диффузный и контрагированный. При обжатии столба электрической дуги, что характерно для плазменных устройств при интенсивном охлаждении (увеличении подачи рабочего газа) происходит ее контракция, которая сопровождается уменьшением диаметра столба и приводит к увеличению напряжения на дуге и резкому изменению соотношения d/U, где d – диаметр дугового столба; U – падение напряжения на дуге.

При этом наблюдаются значительные изменения концентрации электронов из-за высокой неоднородности значения температуры плазмообразующего газа в сечении рабочей камеры. Уменьшение скорости фронта ионизации, ее перемещения влияет на пространственные характеристики плазменной струи, при этом в режиме контракции значительную часть составляет тепловое излучение (50–99) %.

Поставщиком электронов для существования электрической дуги выступают процессы термической ионизации плазмообразующей среды [6]. Материал электродов, попадающий в зону горения разряда за счет эрозии может существенно влиять на распределение тепловых потерь, так как может играть роль своеобразного «экрана» для излучения из зоны разряда. Из-за подачи рабочего газа по нормали к внешней границе электроразрядной камеры и использованию принудительного охлаждения стенок слой рабочего газа, прилегающий к ним, остается достаточно холодным в процессе работы генератора плазмы. Вследствие этого становится практически невозможным повреждение стенок камеры электрической дугой.

Оценка параметров процессов, происходящих в дуговом разряде генератора плазмы, возможна в приближении локального термодинамического равновесия. Напряженность электрического поля в столбе дугового разряда можно рассчитать по формуле

$$E = \frac{U - U_{\text{а}} - U_{\text{к}}}{l_{\text{д}}} \ (\text{В/см}), \qquad (1)$$

где $U_{\text{а}}$ – анодное падение напряжения, В; $U_{\text{к}}$ – катодное падение напряжения, В; U – падение напряжения на электродах, В; $l_{\text{д}}$ – длина дуги, см.

Допускаем однородность проводящей области в поперечной плоскости, плотность тока в дуге равна

$$j = \frac{I}{S_{\text{пр}}} \ (\text{А/см}^2), \qquad (2)$$

где $S_{\text{пр}}$ – площадь сечения проводящей области, см^2.

Плотность тока складывается из электронной и ионной составляющей, оценим необходимое количество носителей тока для обеспечения такой плотности

$$j = n_e \cdot e \cdot v_e + n_i \cdot e \cdot v_i \ (\text{А/см}^2), \qquad (3)$$

где v_e, v_i – скорость дрейфа электронов и ионов в электрическом поле, см/с; n_e, n_i – количество электронов и положительных ионов в единице объема, см$^{-3}$; e – заряд электрона, Кл.

Проводимость газа равна

$$\sigma = \frac{j}{E} \ (1/\text{Ом·м}). \qquad (4)$$

Зная значение проводимости в зоне разряда, можно приблизительно оценить температуру. Для этого значения проводимости температура воздуха T≈5500–7000 К, хотя учитывая наличие паров металла электродов в разряде, температура может быть несколько ниже. Общее число частиц газа в единице объема составит

$$N = \frac{p}{k \cdot T} \ (\text{см}^{-3}), \qquad (5)$$

где p – давление, Па; k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – температура, К.

Дрейфовая скорость электронов $v_e \sim 6 \cdot 10^5$ (см/с). Таким образом, необходимая плотность электронов составит

$$n_e \approx \frac{j}{e \cdot v_e} \text{ (см}^{-3}\text{)}. \quad (6)$$

Для диффузного разряда плотность электронов равна приблизительно 10^{14} см$^{-3}$, а для контрагированного разряда ~ 10^{15}–10^{17} см$^{-3}$ в зависимости от силы тока.

Некоторые области применения плазменной техники

Генераторы плазмы переменного тока, разработанные в ИЭЭ РАН, применяются в плазмохимических установках различного назначения (уничтожение и переработка различного сырья, в том числе и отходов для получения полезного продукта – сингаза; получение ультрадисперсных оксидных и карбидных материалах; плазменное напыление):

– в области переработки опасных веществ [7]. Экспериментально подтверждены следующие результаты: коэффициент конверсии на HCl ~ 99,9 %, по NO_x более 90 %, для хладона 113 ($C_2F_3Cl_3$) степень минерализации по HCl~99,6 %, по HF – 98,6 %;

– в области газификации ТЖО (твердых и жидких отходов) [8]. Экспериментально получен синтез газ с энергосодержанием ~7,4 МДж/м^3 (CO~32 %, H_2~28 % , N_2~29 %);

– в области газификации ТО и угля [9]. Получен (древесные отходы) синтез газ с энергосодержанием ~6 МДж/м^3, при этом выход газа составлял ~3 м^3/кг. При газификации каменных углей – газ с энергосодержанием ~(3,5–3,6) МДж/м^3, выход газа ~3,5 м^3/кг;

– получение ультрадисперсных оксидных материалов [5], [10]. Мощность генератора плазмы ~ 6 кВт, суммарный расход плазмообразующего газа (воздуха) по всем контурам подачи достигал значения ~ 1 г/с. В качестве прекурсора использовался раствор солей металлов, он вводился в зону плазменной струи в водном растворе, расходом 0,5–1,5 г/с. Был получен мелкодисперсный порошок бурого цвета, который, согласно результатам рентгенофазового анализа, представляет собой практически однофазный α-Fe_2O_3, средний размер кристаллитов составил 57±6 нм;

– получение ультрадисперсных карбидных материалов [11]. Мощность генератора плазмы до 3 кВт (зависит от состава плазмообразующего газа). Состав рабочей газовой смеси – водород-метан в примерном соотношении 1:1. Для проведения анализа фазового и гранулометрического состава полученных продуктов использованы методы рентгенофазовой дифрактометрии и сканирующей микроскопии.

Список источников

1. *Сафронов А. А., Кузнецов В. Е., Васильева О. Б.* Плазмотроны переменного тока. Системы инициирования дуги. Особенности конструкции и применения // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 2. С. 58–66.

2. *Сафронов А. А., Кузнецов В. Е., Васильева О. Б.* Исследование работы высоковольтных плазмотронов со стержневыми электродами // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56. № 6. С. 926–931.

3. *Dudnik Y., Borovskoy A., Shiryaev V.* Plasma injector for a three-phase plasma torch with rail electrodes and some results of its investigation // Journal of Physics: Conference Series. 32. XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, ELBRUS 2017. 2018. P. 012167.

4. *Kuznetsov V., Safronov A., Shiryaev V.* Application field and ways to control ac plasma torch with rail electrodes // Journal of Physics: Conference Series. 32. XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, ELBRUS 2017. 2018. P. 012166.

5. *Сафронов А. А., Кузнецов В. Е., Дудник Ю. Д.* Плазменное получение ультрадисперсных оксидов железа и алюминия // Прикладная физика. 2021. № 3. С. 66–71.

6. *Глебов И. А., Рутберг Ф. Г.* Мощные генераторы плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 153 с.

7. *Rutberg P., Ufimtsev A., Bratsev A.* Application of ac powerful plasma generators in plasma chemical technologies of toxic waste treatment // Progress in Plasma Processing of Materials. Danbury, 1999. P. 821–827.

8. *Сафронов А. А., Братцев А. Н., Кузнецов В. Е.* Использование высоковольтных плазмотронов переменного тока при создании макетной установки по разложению хлор-фторсодержащих токсичных веществ // Физика низкотемпературной плазмы ФНТП-98. Материалы конференции по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-98. 1998. С. 583–586.

9. *Surov A., Popov S., Popov V.* Multi-gas ac plasma torches for gasification of organic substances // Fuel. 2017. Vol. 203. P. 10071–10014.

10. *Dudnik Y., Safronov A., Kuznetsov V.* Plasma ways to obtain ultrafine oxides// В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. The conference proceedings. 2019. P. 012127.

11. *Кузнецов В. Е., Дудник Ю. Д., Сафронов А. А.* Исследование плазмотрона переменного тока для получения высокодисперсных порошков тугоплавких металлов // Прикладная физика. 2022. № 2. С. 72–77.

УДК 621.313.3 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-396-403**

Л. И. Чубраева*, *****
доктор технических наук, член-корреспондент РАН
**ФГБУН «Институт электрофизики и электроэнергетики РАН»*
***ФБГУН «Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН»*

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Рассмотрены вопросы применения интеллектуальных материалов для судовых электроэнергетических устройств. Отражены вопросы классификации интеллектуальных материалов. Рассмотрены проблемы использования высокотемпературных сверхпроводниковых материалов для судовых гребных электродвигателей.
Ключевые слова: *судовая электроэнергетика, интеллектуальные материалы, адапторы, магнитные жидкости, сверхпроводники, высокочистые металлы, высококоэрцитивные магниты.*

L. I. Chubraeva*, *****
Dr. Sc. Tech., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences
**Institute of Electrophysics and Electric Power Engineering, Russian Academy of Sciences*
***I. V. Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry, Russian Academy of Sciences*

INVESTIGATION OF INTELLIGENT MATERIALS USED TO IMPROVE THE ELECTRICAL DEVICES OF THE SHIP'S ELECTRIC POWER INDUSTRY

The article deals with the application of intelligent materials for shipboard electric power devices. The issues of intelligent materials classification are reflected. The problems of using high-temperature superconducting materials for marine propulsion motors are considered.
Keywords: *ship electric power, smart materials, adapters, magnetic fluids, superconductors, high-purity metals, high-coercivity magnets.*

Введение

Исследования в области интеллектуальных материалов ведутся в нашей стране и за рубежом в течение многих лет. Однако систематизация этих исследований под общим термином «интеллектуальные материалы» произошла только в последнее десятилетие. Утвержденная 31 декабря 2020 года. Программа фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 гг.) в Подпрограмме 2 «Фундаментальные и поисковые исследования» рассматривает как приоритетный вопрос о разработке научных основ создания устройств децентрализованной энергетики с использованием интеллектуальных материалов.

Интеллектуальными называются материалы, которые могут контролируемым образом изменять свои свойства в ответ на изменение внешних воздействий. Особенностью интеллектуальных материалов является их способность преобразовывать физические параметры или виды энергии. Ключевым фактором для практического применения является то, что этими преобразованиями можно управлять [1], [2].

Интеллектуальные материалы подразделяются на следующие основные группы: адапторы, трансформаторы (актуаторы и индикаторы) и нейтрализаторы. Адапторы – это материалы, которые под влиянием внешнего воздействия изменяют свои характеристики (рис. 1). Трансформаторы – материалы, которые преобразуют энергию внешнего воздействия в выходное действие (сигнал «отклика»), изменяя при этом вид энергии или ее интенсивность, они включают две подгруппы – актуаторы и индикаторы. Нейтрализаторы (neutralizers, аналоги «мудрых» материалов) – это такие вещества, которые не только обнаруживают вредное воздействие, но и сами устраняют причины его возникновения.

Предметом дальнейших исследований являются адапторы для криогенной энергетики, к которым могут быть отнесены сверхпроводники, высокочистые металлы магнитные жидкости, а

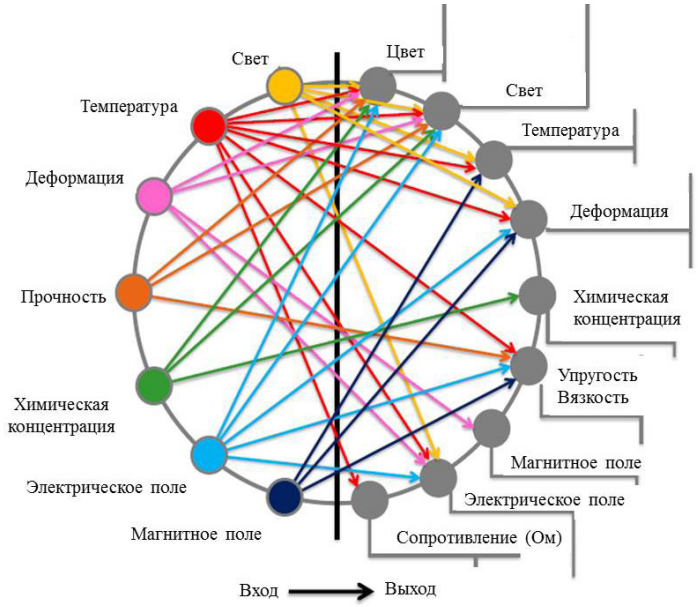


Рис. 1. Классификация адапторов

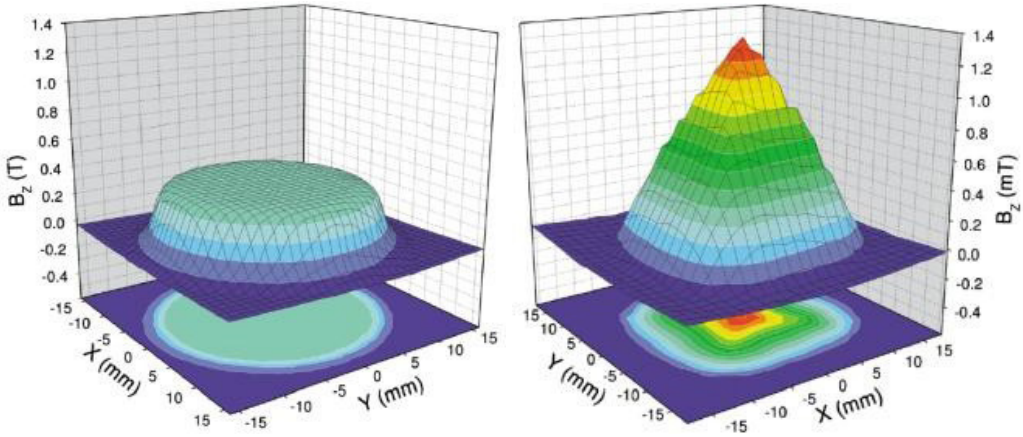


Рис. 2. Магнитное поле круглого постоянного магнита (слева) и ВТСП массива (справа)

также постоянные магниты, которые при криогенных температурах относят к квази-интеллектуальным материалам [7]. Адапторы могут быть использованы при создании синхронных генераторов и двигателей, трансформаторов, кабелей, ограничителей токов КЗ и накопителей энергии для судовой электроэнергетики.

Исследование высокотемпературных сверхпроводников. Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), в отличие от низкотемпературных сверхпроводников (НТСП), имеют две модификации: ВТСП массивы и ВТСП ленты. Массивы из иттриевой керамики в определенной степени схожи с постоянными магнитами: циркулирующий в них ток создает аксиально направленное магнитное поле (рис. 2) [3].

ВТСП массивы были использованы в индукторах гистерезисных и синхронных двигателей (рис. 3) и в магнитных подшипниках как электрических машин, так и кинетических накопителей энергии.

Рис. 3. Диск ротора с ВТСП массивами из иттриевой керамики для синхронного двигателя мощностью 50 кВт

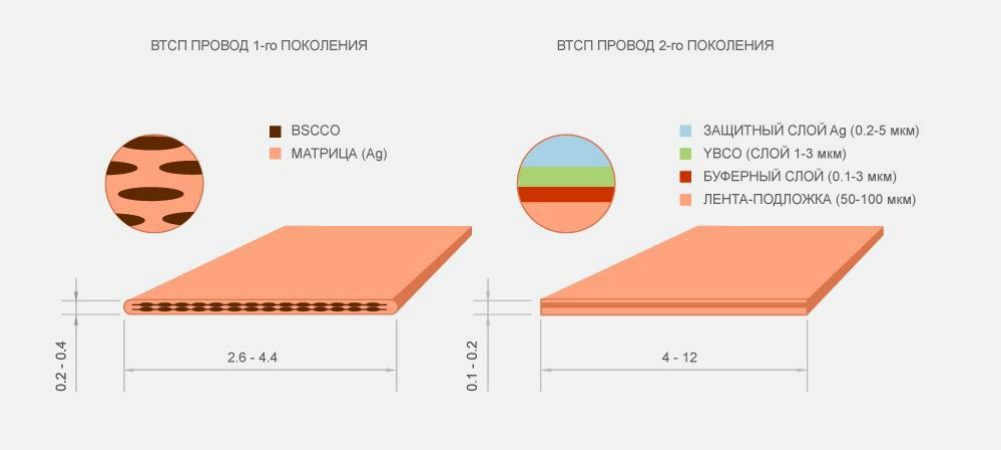


Рис. 4. Поперечное сечение ВТСП лент 1G и 2G

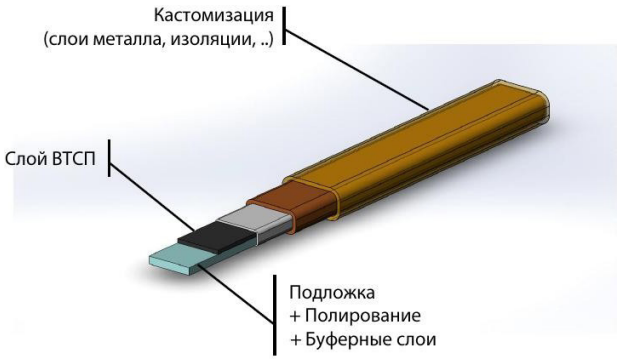


Рис. 5. ВТСП лента второго поколения

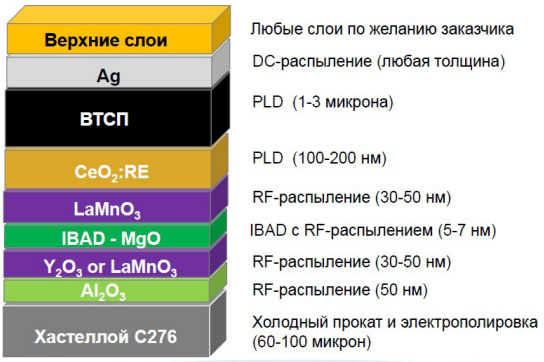


Рис. 6. Современная архитектура ВТСП лент

Максимальная достигнутая мощность в сдвоенном гистерезисном двигателе с ВТСП массивами составила 200 кВт [4]. В настоящее время ВТСП массивы, к которым добавились массивы из диборида магния, для индукторов электрических машин не применяются.

Ленточные ВТСП провода в настоящее время разделились на провода 1-го и 2-го поколения. Различие между этими проводами показано на рис. 4.

ВТСП провод второго поколения имеет слоистую структуру. Стабилизирующие слои служат не только для стабилизации электрических параметров сверхпроводника, но также предохраняют сверхпроводник от контакта с воздушной средой (рис. 5 и 6) [5].

Работа с ВТСП проводами 2-го поколения показала, что на данном этапе они требуют большей аккуратности в работе, чем провода 1-го поколения. На рис. 7 показана изготовленная нами трековая катушка для обмотки возбуждения синхронного генератора из ВТСП 1-го поколения, уложенная на каркасе.

Нами разработан алгоритм изготовления круглых катушек из ВТСП 2-го поколения с пропиткой эпоксидным компаундом, который успешно опробован на ряде модельных синхронных машин с ВТСП обмоткой якоря.

Ниже приведены примеры катушек и подготовленных к сборке слоев обмотки якоря (рис. 9, 10).

Уровень потерь на переменном токе в ВТСП проводах 2G показан на рис. 11 [6].

Высокочистые металлы

Возможность использования высокочистых металлов (99,999) для обмоток электрических машин изучалась в нашей стране и за рубежом с 60-х годов прошлого века. Наиболее перспективными считались высокочистые алюминий и бериллий. Удельное электрическое сопротивление алюминия при 20 К – 4.10–11 Ом·м (рабочая температура на уровне 20 К), бериллия при 77 К – 4,8.10–10 Ом·м (рабочая температура на уровне 77 К). Чистая медь по этим показателям проигрывала чистому алюминию и чистому бериллию и особо не изучалась. Чистый алюминий – очень хрупкий материал. Нами совместно с АО «Высокотехнологический институт неор-

Рис. 7. Катушка ВТСП обмотки возбуждения для синхронного генератора 4 МВА

Рис. 8. Процесс намотки ВТСП катушки

Рис. 9. После пропитки катушки компаундом холодного отверждения

Рис. 10. Статор с круглыми катушками обмотки якоря для одной из экспериментальных машин

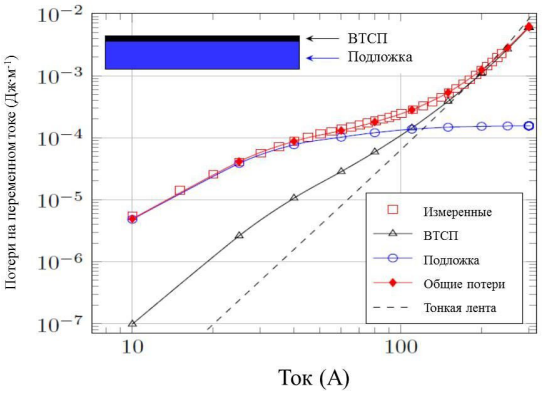


Рис. 11. Потери в слоях ВТСП лент 2-го поколения на переменном токе

ганических материалов им. А. А. Бочвара» была разработана технология производства композитных проводов из высокочистого алюминия в медной матрице для применения на постоянном и переменном токах. Эту технологию никому не удалось повторить. Были изготовлены и испытаны опытные стержни обмотки статора для высокооборотного генератора из провода

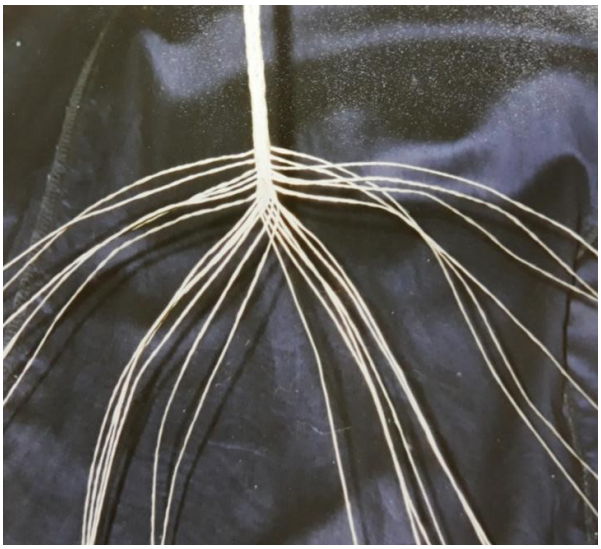


Рис. 12. Плетение транспонированного стержня из композитного высокочистого алюминия (провод в электрической изоляции)

диаметром 0,3 мм, содержащего 49 твистированных нитей высокочистого алюминия в медной матрице. Из-за ограниченной длины проводов на первом этапе их производства транспонированные стержни пришлось плести вручную (рис. 12).

Испытания стержней при температуре жидкого водорода (20 К) показали возможность получения средней плотности тока по сечению стержней до 200–250 А/мм^2. После этого был изготовлен и испытан статор синхронного генератора мощностью 4 МВА (рис. 13).

В дальнейшем работы были приостановлены из-за отсутствия финансирования, хотя существует ряд направлений успешного применения этих технических решений. В частности, в случае перехода к охлаждению на уровне жидкого водорода обмотка статора может быть изготовлена из композитного высокочистого алюминия.

Магнитные жидкости

Магнито-реологические жидкости относятся к магнитно-активируемым интеллектуальным материалам [1]. Реологические свойства таких жидкостей изменяются при наложении магнитного поля. Вызываемое изменение пропорционально напряженности магнитного поля, может точно регулироваться наложением этого поля и исчезает после его снятия.

Типичная магнитная жидкость представляет собой суспензию микрочастиц магнитных материалов размером в несколько микрон в жидкости-носителе. Магнитные материалы – это обычно чистое железо, жидкости-носители – минеральные или синтетические масла и др. Для предотвращения оседания частиц добавляются поверхностно-активные вещества. Магнитные свойства жидкостей могут быть разрушены при нагреве до температуры Кюри.

Основное применение магнитных жидкостей в криогенике – создание магнито-жидкостных уплотнений для хладагентов ротора. Это неотъемлемая часть всех криогенных электротехнических устройств. Нами она впервые была применена для уплотнения обратных потоков гелия в НТСП турбогенераторе 20 МВА в 1980 году. Принципиальная схема такого уплотнения показана на рис. 14.

В 80-е годы прошлого века нами была опробована небольшая синхронная электрическая

Рис. 13. Статор криогенного генератора с обмоткой из высокочистого алюминия и сердечником из ленточной аморфной стали

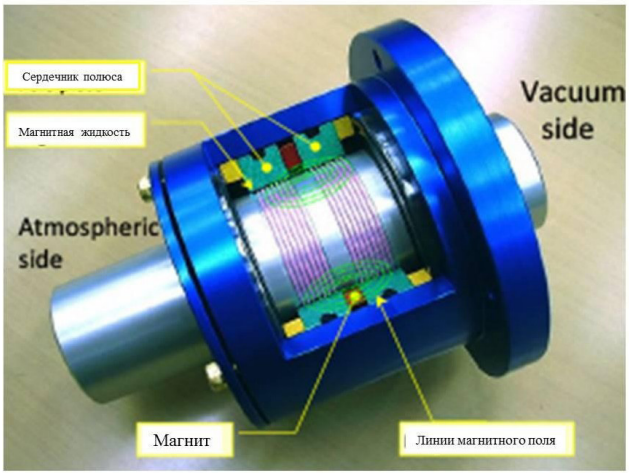


Рис. 14. Магнитожидкостное уплотнение – обязательный элемент криогенных устройств (слева – комнатная температура, справа – криогенная зона)

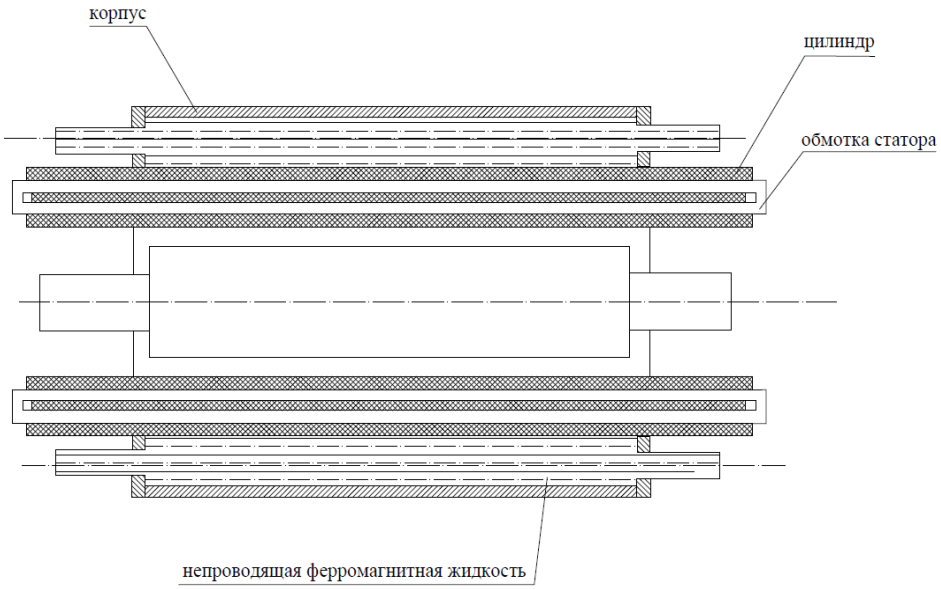


Рис. 15. Принципиальная схема модельной синхронной машины

машина с ферромагнитным сердечником, использующим магнитную жидкость как магнитную среду и как охлаждающую жидкость (рис. 15). Решение интересное и может быть применено для небольших электрических машин.

Магнитотвердые материалы

Редкоземельные магниты в принципе не относятся к интеллектуальным материалам [7]. Однако отличительной особенностью магнитов на основе Nd-Fe-B является особенность их характеристики $B=f(t)$ при охлаждении ниже 273 К. На рис. 16 показано изменение намагниченности круглого магнита из Nd-Fe-B при охлаждении от 273 до 77 К. Видно, что в процессе захолаживания индукция на поверхности магнита повышается (для разных образцов от 12 до 15 %), а затем резко снижается. Снижение происходит на величину $\cos(\pi/6)$ [8], [9]. Предпочтительной рабочей температурой для этого материала является диапазон криогенных температур 120–140 К.

При повторном захолаживании кривая получилась такой же, в отличие от поведения Nd-Fe-B при комнатной температуре. Все это позволило отнести эти магнитотвердые материалы к квази-интеллектуальным адаптерам. Магниты на основе Sm-Co ведут себя по-другому (рис. 17) [9]. У них нет увеличения намагниченности при понижении температуры, но их отличает большая стабильность в широком диапазоне криогенных температур. Поэтому выбор материала магнита – за разработчиком устройства. При этом следует иметь в виду более высокую стоимость магнитов из самарий-кобальта.

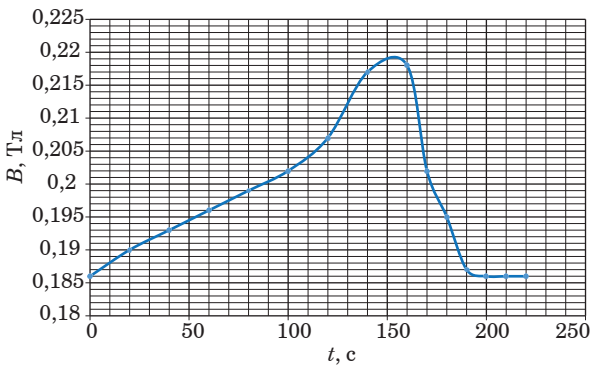


Рис. 16. Кривая захолаживания магнита из неодим-железо-бора

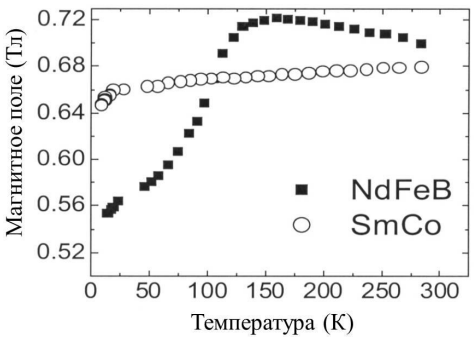


Рис. 17. Сопоставление характеристик редкоземельных магнитов при криогенных температурах

Рис. 18. Примеры роторов с постоянными магнитами Nd-Fe-B для ВТСП синхронных машин с охлаждением N2

Рис. 19. Сверхпроводниковая электроэнергетическая установка

Для получения большего эффекта от Nd-Fe-B желательно разработать такую схему охлаждения, чтобы магниты находились в указанном выше интервале температур. Это не всегда возможно. В созданных нами многодисковых ВТСП синхронных машинах с возбуждением от постоянных магнитов удалось за счет выбора величины воздушного зазора получить оптимальную рабочую температуру магнитов (рис. 18).

Следует особо отметить, что коэрцитивная сила обоих типов магнитов повышается при криогенных температурах в 5–7 раз, размагнитить их в действующем электротехническом устройстве практически невозможно.

На рис. 19 и 20 показаны модельная автономная энергетическая ВТСП установка мощностью 50 кВт, а также результаты разработки криогенного электроэнергетического комплекса мощностью 35 МВт для плавучей атомной электростанции. При их разработке и создании использовались рассмотренные выше интеллектуальные материалы.

Применение явления сверхпроводимости в судовых системах электродвижения позволяет получить следующие дополнительные преимущества к общим преимуществам сверхпроводникового электротехнического оборудования:

– увеличение скорости на 20–30 %,

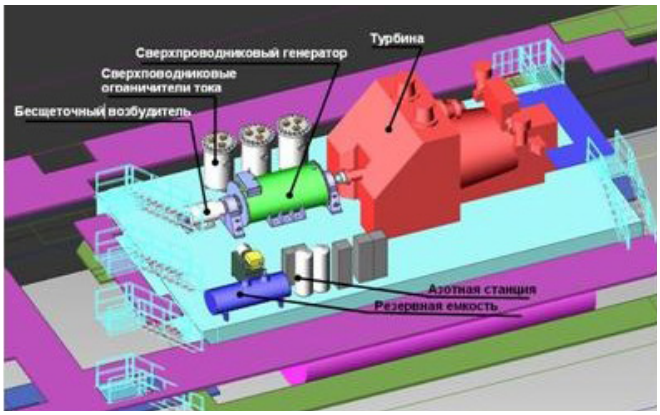


Рис. 20. Компоновка машинного зала плавучей АЭС с ВТСП генератором и периферийным оборудованием

– улучшение маневренности,

– освобождение до 20 % водоизмещения для другого целевого использования,

– значительное снижение акустических шумов.

Заключение

Задачи создания нового поколения судового электротехнического оборудования могут быть успешно решены за счет применения таких интеллектуальных материалов, как высокотемпературные сверхпроводники, высокочистые металлы, магнито-реологические жидкости, постоянные магниты.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования РФ Программ фундаментальных исследований РАН и Соглашения № 075-15-2020-903 от 16.11.2020.

Список источников

1. *Бхваср Р.* Новые интеллектуальные материалы // Нефтегазовое обозрение. 2008. С. 38–49.

2. *Jang Y., Guo C., Wang T.* Smart materials for energy harvesting and thermal management // 13th International Conference on Advanced materials and Nanotechnology. Osaka, 2017. Proceedings. Vol. 5. P. 62.

3. *Habisreuther T.* Bulk YBCO for flywheels and other power applications // Proc. of ASSE'04. Budapest, 2004. P. 131–162.

4. Электрические машины с массивными высокотемпературными сверхпроводниками / Под ред. Л. К. Ковалева, К. Л. Ковалева. М.: Физматлит. 2010. 395 с.

5. URL: www.superOx.ru (дата обращения: 15.08.2022).

6. Study of ac loss reduction in HTS coil for armature winding of ac rotating machines / S. Fukui, Sh. Tsukamoto, K. Nohara, T. Nakamura // IEE Trans. on Applied Superconductivity. 2016. Vol. 26.

7. URL: https://www.kjmagnetics.com/blog.asp?p=temperature-and-neodymium-magnets/ (дата обращения: 15.08.2022).

8. URL: www.spring8.or.jp/pdg/en/res-fro/04/129–161.pdf (дата обращения: 15.08.2022).

9. Using permanent magnets at low temperatures, ARNOLD, TECHNotes, TN 0302, June 2003. 4 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Альмухамедов Алексей Игоревич
Студент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – биометрическая идентификация.
aleksei.alm@gmail.com

Алябьев Максим Олегович
Магистрант кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – мобильная робототехника, цифровая обработка данных.
olmax0709@mail.ru

Амплеева Анна Владимировна
Студентка кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – синтез САУ, нечеткие регуляторы.
a.ampleyeva@gmail.com

Афанасьев Иван Софронович
Магистр кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – машинное зрение в робототехнике.
ivanafv@yandex.ru

Афанасьева Александра Валентиновна
Старший преподаватель кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – стеганография, кодовые методы, распределенные протоколы.
alra@k36.org

Афонин Дмитрий Вячеславович
Инженер кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – робототехника, системы управления, моделирование динамических процессов.
teormeh@inbox.ru

Бадика Егор Максимович
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – мехатроника и робототехника, искусственный интеллект, нейронные сети, кибербезопасность, информационная безопасность, генетические алгоритмы.
embadika@gmail.com

Беззатеева Вероника Сергеевна
Старший преподаватель кафедры информационного права и таможенного дела.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – защита несовершеннолетних в сети Интернет, защита персональных данных.
bezzateeva@inbox.ru

Безмен Петр Анатольевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – мобильная робототехника, цифровая обработка данных.
системы автоматического управления.
pbezmen@yahoo.com

Белай Василий Евгеньевич
Ассистент кафедры электромеханики и робототехники, заведующий лабораторией робототехники Инженерной школы ГУАП.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы интернет вещей, формирование систем автоматического управления, информационная безопасность.
Belvasevg@yandex.ru

Березкин Даниил Александрович
Магистрант кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность.
Dankrou@mail.ru

Бобрышов Алексей Павлович
Аспирант кафедры электромеханики и робототехники..
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – мехатроника и робототехника, искусственный интеллект, автоматизация, цифровые технологии, машинное обучение, компьютерное зрение, электроснабжение, электроэнергетика, электромеханика, качество электрической энергии.
ap.bobryshov@mail.ru

Бобрышов Данил Павлович
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационные технологии, информационные системы, прикладная информатика, виртуальная реальность, дополненная реальность, искусственный интеллект, кибербезопасность, программная инженерия.
danil.bobryshov@mail.ru

Бойков Владимир Иванович
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы автоматического управления техническими объектами.
viboikov@mail.ru

Брунов Максим Сергеевич
Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – нечеткие регуляторы, пространство состояний, дискретные системы.
mak-brunov@yandex.ru

Буйчик Диана Димовна
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники, инженер Инженерной школы ГУАП.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – энергетика, силовая электроника, цифровая трансформация.
buychikdd@mail.ru

Булатов Виталий Владимирович
Кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – методы контроля материалов и изделий, эксплуатационная надежность технических систем.
bulatov-vitaly@yandex.ru

Бурковский Александр Викторович
Декан факультета энергетики и систем управления, кандидат технических наук, доцент.
Воронежский государственный технический университет.
Область научных интересов – автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.
bav@vorstu.ru

Бурковский Виктор Леонидович
Заведующий кафедрой электропривода, автоматики и управления в технических системах, профессор.
Воронежский государственный технический университет.
Область научных интересов – управление в технических системах, автоматизированные системы безаварийного управления технологическими процессами.
bvl@vorstu.ru

Бухвалов Павел Сергеевич
Студент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, машинное обучение, техническая защита информации.
xaksleed@yandex.ru

Бушуев Александр Борисович
Кандидат технических наук, старший преподаватель факультета системы управления и робототехники.
Национальный исследовательский университет ИТМО.
Область научных интересов – разработка физического принципа действия технических систем.
bushuev@inbox.ru

Васильева Ольга Борисовна
Научный сотрудник.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Область научных интересов – низкотемпературная плазма, плазмохимические установки, ультрадисперсные материалы.
rc@iperas.nw.ru

Ватаева Елизавета Юрьевна
Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы автоматического управления, электрический привод.
Kaf31guap@gmail.com

Веригин Александр Николаевич
Заведующий кафедрой мехатронных технологических комплексов.
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет).
Область научных интересов – разработка и проектирование вибрационного оборудования для химической промышленности.
averigin@bk.ru

Ветлицын Михаил Юрьевич
Ассистент, аспирант.
Волгоградский государственный технический университет.

Область научных интересов – автоматизация производственных процессов, робототехника и мехатроника, автоматизированный электропривод.
mikhail.vetlitsyn@mail.ru

Ветлицын Юрий Александрович
Начальник ЭТЛнк.
МУП «Метроэлектротранс», г. Волгоград.
Область научных интересов – автоматизация производственных процессов, робототехника и мехатроника, автоматизированный электропривод.

Владимиров Руслан Андреевич
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – компьютерные технологии в мехатронике и робототехнике.
vladimirov.ruslan2@yandex.ru

Воронов Андрей Владимирович
Кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технологии обеспечения информационной безопасности объектов, техническая защита информации, защита и обработка документов ограниченного доступа, защита информации.
voron-a@inbox.ru

Выграновская Арина Вячеславовна
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники, инженер лаборатории робототехники Инженерной школы ГУАП.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы интернет вещей, формирование систем автоматического управления, информационная безопасность.
arinavygranovskaya@yandex.ru

Ганьшин Юрий Анатольевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электромагнитное поле, электромагнитные датчики.
iyury40@gmail.com

Гарматий Наталия Игоревна
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – облачные технологии, робототехника.
garmaty@mail.ru

Голубков Виктор Александрович
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – контроль и диагностика электромеханических систем.
viktor-golubkov@yandex.ru

Городецкий Андрей Емельянович
Доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Интеллектуальные электромеханические системы».
Институт проблем машиноведения РАН.
Область научных интересов – математическое моделирование, оптимальное управление, идентификация и диагностика.
g27764@yandex.ru

Гречкин Никита Леонидович
Ассистент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – нелинейные системы управления, оптимизация.
space.suai@bk.ru

Григорьев Григорий Кириллович
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – беспилотники и алгоритмы управления.
irogerg01@yandex.ru

Давидович Борис Владимирович
Магистрант.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы с распределенными параметрами.
davidovichborisvladimir@yandex.ru

Данилов Александр Дмитриевич
Профессор кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования.
Воронежский государственный технический университет.
Область научных интересов – автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.
danilov-ad@yandex.ru

Дашевский Владимир Павлович
Старший научный сотрудник.
Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук.

Область научных интересов – специализированные вычислители, системы реального времени, цифровая обработка сигналов, ускорители вычислений на ПЛИС.
vladimir.dashevsky@gmail.com

Дудник Юлия Дмитриевна
Научный сотрудник.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Область научных интересов – низкотемпературная плазма, плазмохимические установки, ультрадисперсные материалы.
julia_dudnik-s@mail.ru, rc@iperas.nw.ru

Елина Татьяна Николаевна
Кандидат экономических наук, доцент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, облачные технологии, математическое моделирование, нейронные сети, экспертные системы, системы поддержки и принятия решений, оценка экономической эффективности.
elinatn@yandex.ru

Елтышев Борис Константинович
Кандидат технических наук, доцент кафедры судовой автоматики и измерений.
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет.
Область научных исследований – имитационное моделирование сложных систем.
bkelt1@yandex.ru

Елтышева Ирина Владимировна
Старший преподаватель кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование систем, информационная безопасность.
eltiv1@yandex.ru

Епифанцев Кирилл Валерьевич
Кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – измерение дефектов формы.
epifancew@gmail.com

Ершов Дмитрий Юрьевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики и механики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – исследование вибрационных процессов многозвенных механических систем технологического оборудования.
fetcat@mail.ru

Железняк Иван Николаевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – нетрадиционная электромеханика, авиационные электрические машины, электротехника оборудования АЭС.
zhelezniak.i.n@yandex.ru

Жеребко Сергей Олегович
Магистрант кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – детектирование стабилизации электронных частиц.
serga56@bk.ru

Замурагин Юрий Михайлович
Аспирант, младший научный сотрудник.
Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН.
Область научных интересов – динамика нелинейных систем, механика машин и управление машинами.
yury.zamuragin@yandex.ru

Зырянов Дмитрий Александрович
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – нейронные сети, искусственный интеллект, мехатроника, киберфизические системы, робототехника, алгоритмы управления.
zyrikdima@gmail.com

Иванов Максим Дмитриевич
Инженер кафедры электротехники и электрооборудования предприятий.
Уфимский государственный нефтяной технический университет.
Область научных интересов – силовые преобразовательные устройства.
maxivanovd@mail.ru

Исаков Константин Сергеевич
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – мехатроника и робототехника.
Isakov-k-s99@mail.ru

Камышева Людмила Валерьевна
Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – мехатроника и робототехника.
sobol-lyudmila@mail.ru

Карпов Евгений Ишханович
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники, инженер студенческого конструкторского бюро Инженерной школы «Силовые Машины – ГУАП», инженер-конструктор отдела специальных электрических машин «АО Силовые Машины» Электросила.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электропривод, силовая электроника, электромеханика.
ewgenij.carpov@yandex.ru

Карпухин Дмитрий Николаевич
Аспирант кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах.
Воронежский государственный технический университет.
Область научных интересов – автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.
karpuxin.1996@mail.ru

Князев Андрей Александрович
Инженер кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – машиностроение, робототехнические системы, человеко-машинные системы.
ak290599@yandex.ru

Коломойцев Владимир Сергеевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – построение информационных систем в защищенном исполнении, нормативно-правовая защита информации, оценка эффективности систем защиты информации, построение киберфизических систем.
Dekoros@guap.ru

Коробчук Максим Васильевич
Докторант.
Санкт-Петербургский государственный технологический институт.
Область научных интересов – разработка и проектирование вибрационного оборудования для химической промышленности.
korobchuk_max@mail.ru

Кудрявцев Николай Витальевич
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – машинное обучение.
kellendross@yandex.ru

Кузенов Виктор Витальевич
Доктор физико-математических наук, доцент, профессор МГТУ им. Н. Э. Баумана, ведущий научный сотрудник ВНИИА им. Н. Л. Духова.
Область научных интересов – плазменные разряды, радиационная магнитно-газовая динамика, математическое моделирование, физика плазмы.
vik.kuzenov@gmail.com

Кузнецов Владимир Евгеньевич
Кандидат технических наук, заведующий лабораторией.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Область научных интересов – низкотемпературная плазма, плазмохимические установки, ультрадисперсные материалы.
rc@iperas.nw.ru

Кузьменко Владимир Павлович
Кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – цифровая энергетика.
mr.konnny@gmail.com

Кузьменко Роман Юрьевич
Аспирант кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования.
Воронежский государственный технический университет.
Область научных интересов – автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.
kuzromik7@yandex.ru

Кузьменко Юрий Павлович
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – светотехника, электроснабжение, электромеханика, электроэнергетика, энергетические системы, системы компенсации емкостных токов.
spider56boy@gmail.com

Кузьмин Александр Алексеевич
Кандидат технических наук, доцент.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – системный анализ, управление и обработка информации.
Ku3bmin@gmail.com

Куликова Татьяна Дмитриевна
Магистрант кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы управления, прецизионный электропривод.
Tanya_kulikova99@mail.ru

Куликовская Анастасия Витальевна
Ассистент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – энергосбережение и повышение энергетической эффективности, надежность электроэнергетических систем.
malinalina96@mail.ru

Курбанов Вугар Гариб Оглы
Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы управления с искусственным интеллектом. vugar_borchali@yahoo.com

Курушин Данил Александрович
Студент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, информационные системы.
dakurushin@gmail.com.

Куцулим Денис Владимирович
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники, инженер лаборатории робототехники Инженерной школы ГУАП.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – проектирование, электротехника, схемотехника.
denis171099@yandex.ru

Лебедев Денис Константинович
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университета аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электрические машины, компьютерные сети численные методы технической физики, моделирование сложных технических систем с антропокомпонентами в их составе.
gdandee822@gmail.com

Леушев Дмитрий Владимирович
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – автоматизация робототехнических комплексов.
d_leushev@mail.ru

Литвинов Юрий Володарович
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – управление подвижными объектами.
yurl13@yandex.ru

Логунов Егор Романович
Инженер.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – мехатроника и робототехника.
Logunov199@yandex.ru

Локтионова Оксана Геннадьевна
Профессор кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – механика, динамика сплошных сред, вибрационные машины и технологии, мехатроника, робототехника.
log7.9@mfil.ru

Лукичев Павел Андреевич
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электрические машины и аппараты.
p.lukichev@gmail.com

Лукьяненко Ирина Николаевна
Кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики и механики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – контроль, диагностика и прогнозирование технического состояния электромеханических систем приборостроения.
irina.n.lukyanenko@gmail.com.

Лушников Борис Владимирович
Доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – системы управления, компьютерное моделирование, подводная робототехника, вибродиагностика.
bvl_61@inbox.ru

Ляшенко Александр Леонидович
Кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы с распределенными параметрами.
akuna_matata_kmv@mail.ru

Мальчиков Андрей Васильевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – робототехника, системы управления, моделирование динамических процессов.
zveroknnp@gmail.com

Мартынов Александр Александрович
Кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электропривод, силовая электроника, программирование контроллеров.
martynov41@mail.ru

Мельников Сергей Юрьевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электротехника.
sburime@mail.ru

Михайлова Алина Алексеевна
Магистрант кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы управления, прецизионный электропривод.
alianamikhailova@yandex.ru

Михеев Илья Сергеевич
Студент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, информационные системы.
makiluxa@gmail.com

Мухаметшин Андрей Валерьевич
Доцент базовой кафедры электроэнергетики и электротехнологий.
Уфимский государственный нефтяной технический университет.
Область научных интересов – высоковольтные испытательные установки.
mukhametshinav@yandex.ru

Мыльников Владимир Аркадьевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, облачный технологии, распределенные системы, математическое моделирование.
va.mylnikov@yandex.ru

Налегаев Сергей Сергеевич
Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – алгоритмы искусственного интеллекта (AI), машинного обучения (ML) и применения.
s.nalegaev@gmail.com

Никулин Ярослав Сергеевич
Инженер.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – мехатроника и робототехника.
Xeeroox@mail.ru

Нуйя Ольга Святославовна
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы дистанционного управления в технических объектах.
olga.nuyya@yandex.ru

Павлюков Денис Александрович
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники, инженер студенческого конструкторского бюро Инженерной школы «Силовые Машины – ГУАП», инженер-конструктор отдела специальных электрических машин «АО Силовые Машины» Электросила.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электропривод, силовая электроника, системы управления приводов.
den2691@list.ru

Перлюк Владимир Владимирович
Кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование сложных технических систем, управление группировкой беспилотных аппаратов, микроспутники, летательные аппараты.
perlvv@mail.ru

Песок Валерия Вячеславовна
Аспирант.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – системный анализ, управление и обработка информации.
lera.pesok@mail.ru

Печурин Александр Сергеевич
Инженер кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – робототехника, системы управления, моделирование динамических процессов.
teormeh@inbox.ru

Политов Евгений Николаевич
Доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – мобильная робототехника, моделирование динамических процессов, реология.
politovyevgeny@yandex.ru

Положенцев Дмитрий Сергеевич
Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы управления, прецизионный электропривод.
pds6476564@yandex.ru

Потапов Алексей Александрович
Магистрант кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – стеганография.
aleypotapov@yandex.ru

Пулатов Аброр Обидович
Кандидат технических наук, заведующий кафедрой электромеханики и электротехнологий.
Ташкентский государственный технический университет.
Область научных интересов – электротехнология и электропривод, автоматизация электротехнологических установок и систем, силовая и микроэлектроника.
abrorobidovich@mail.ru

Решетникова Наталия Викторовна
Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы автоматического управления, электрический привод.
Kaf31guap@gmail.com

Романенко Виталий Владимирович
Студент кафедры электромеханики и робототехники..
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология беспроводной передачи электроэнергии, электроэнергетика, электромеханика, цифровые системы релейной защиты, электроснабжение.
sbvitaly@yandex.ru

Романова Марина Сергеевна
Ассистент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроснабжение, автоматизация процессов, жизненный цикл продукции.
marina.2108@mail.ru

Рукавицын Александр Николаевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – биомеханика, биомехатроника и робототехника, роботерапия, нейрореабилитация.
alruk75@mail.ru

Рыжков Сергей Витальевич
Доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры теплофизики.
МГТУ им. Н. Э. Баумана (НИУ).
Область научных интересов – альтернативные системы, магнитно-инерциальный термоядерный синтез, математическое моделирование, ядерная энергетика, физика плазмы.
svryzhkov@bmstu.ru

Рындюк Виктория Александровна
Кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность.
vika012001@mail.ru

Рысин Александр Владимирович
Старший преподаватель кафедры электромеханики и робототехники, заведующий студенческого конструкторского бюро «Силовые машины – ГУАП».
Область научных интересов – электропривод, силовая электроника.
Galewon@yandex.ru

Савельева Екатерина Владимировна
Младший научный сотрудник кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.

Область научных интересов – строительная робототехника, носимые и колесные робототехнические системы.
katyasavelkursk@yandex.ru

Саенко Савелий Сергеевич
Студент.
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет).
Область научных интересов – разработка и проектирование вибрационного оборудования для химической промышленности.
saveliy.saenko@gmail.com

Саксонов Иван Олегович
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – энергоэффективность электроэнергетических систем.
ivansaxonov666@gmail.com

Саламандра Борис Львович
Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.
Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН.
Область научных интересов – механика машин и управление машинами.
salamandra@recuper.ru

Саламандра Константин Борисович
Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией вибротехнических систем.
Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН.
Область научных интересов – механика машин и управление машинами.
ksalamandra@yandex.ru

Салова Ирина Александровна
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование задач методом конечных элементов.
Salova_irine@mail.ru

Самохина Елена Викторовна
Кандидат технических наук, доцент кафедры телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информатики.
МИРЭА – Российский технологический университет.
Область научных интересов – интернет вещей, распределенные информационные системы, теория кодирования, программно-конфигурируемые технологии радиосвязи и радиотелеметрии.
mbse@gmail.com

Сафронов Алексей Анатольевич
Доктор технических наук, заведующий отделением.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Область научных интересов – низкотемпературная плазма, плазмохимические установки, ультрадисперсные материалы.
rc@iperas.nw.ru

Светлов Дмитрий Алексеевич
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – машинное зрение в робототехнике.
rqizutte@gmail.com

Семенников Василий Васильевич
Заместитель генерального директора по науке, кандидат физико-математических наук.
АО «Прогрессивные технологии».
Область научных интересов – техническая физика, системная инженерия.

Сергеев Александр Михайлович
Кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных систем и сетей.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – интернет вещей, распределенные системы online-мониторинга, теория ортогональных преобразований.
aleks.asklab@gmail.com

Сержантова Майя Вячеславовна
Кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электрические машины, компьютерные сети, численные методы технической физики, моделирование сложных технических систем с антропокомпонентами в их составе.
12noch@mail.ru

Сериков Сергей Анатольевич
Доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы и процессы управления, применение интеллектуальных технологий для решения прикладных задач.
srkv@inbox.ru

Создателева Мария Эдуардовна
Ассистент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электроэнергетика и электротехника, мехатроника и робототехника.
macreatoor@yandex.ru

Соколова Ксения Дмитриевна
Магистрант.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы с распределенными параметрами.
ksusha.so-va@yandex.ru

Солёная Оксана Ярославна
Кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – повышение эффективности функционирования электроэнергетических систем, интеллектуальные электрические сети.
osolenaya@list.ru

Солёный Сергей Валентинович
Кандидат технических наук, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники, директор Инженерной школы.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроэнергетика и электротехника, мехатроника и робототехника.
ssv555ssv@yandex.ru

Соловьев Богдан Алексеевич
Инженер кафедры электротехники и электрооборудования предприятий.
Уфимский государственный нефтяной технический университет.
Область научных интересов – альтернативная энергетика и возобновляемые источники энергии, станции зарядки.
raitekk@mail.ru

Софронов Александр Андреевич
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электромеханика, силовая преобразовательная техника.
sofronovalexx21@gmail.com

Статкевич Анастасия Вячеславовна
Ассистент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы автоматического управления, электрический привод.
Astat19@yandex.ru

Судаков Антон Сергеевич
Аспирант кафедры вычислительной техники.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина).
Область научных интересов – сети передачи данных, сетевая безопасность.
asudakov.mail@gmail.com

Таболин Иван Иванович
Аспирант кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования.
Воронежский государственный технический университет.
Область научных интересов – автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.
i@itabolin.ru

Тарасова Ирина Леонидовна
Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник.
Институт проблем машиноведения РАН.
Область научных интересов – компьютерное моделирование, системы управления. g17265@yandex.ru

Тимофеев Сергей Сергеевич
Старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы автоматического управления, электрический привод, электрические машины.
Sergio121@yandex.ru

Ткалич Антон Сергеевич
Студент.
Воронежский государственный технический университет.
Область научных интересов – управление в технических системах, автоматизированные системы безаварийного управления технологическими процессами.
tkalich.anton@mail.ru

Ткалич Сергей Андреевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах..
Воронежский государственный технический университет.
Область научных интересов – управление в технических системах, автоматизированные системы безаварийного управления технологическими процессами.
sergeytkalich@mail.ru

Третьяков Никита Константинович
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроэнергетика, силовая электроника.
Nt7836655@yandex.ru

Фаткиева Роза Равильевна
Кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина).
Область научных интересов – информационная безопасность, системный анализ.
rikki2@yandex.ru

Федоренко Андрей Григорьевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – проблемы повышения точности многополюсных вращающихся трансформаторов.

Федоров Андрей Владимирович
Аспирант кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – робототехнические системы, человеко-машинные системы.
newteormeh@inbox.ru

Филист Сергей Алексеевич
Доктор технических наук, профессор.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – системный анализ, управление и обработка информации.
SFilist@gmail.com

Фомичева Светлана Григорьевна
Кандидат технических наук, профессор кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, интеллектуальные информационные системы, квантовые вычисления.
levikha@rambler.ru

Хазиева Регина Тагировна
Кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрооборудования предприятий.
Уфимский государственный нефтяной технический университет.
Область научных интересов – функциональная интеграция электромагнитных элементов.
khazievart@mail.ru

Хайдер Али Хуссейн Алавси
Аспирант.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – системный анализ, управление и обработка информации.
book.hp.2015@gmail.com

Хакимьянов Марат Ильгизович
Доктор технических наук, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования предприятий.
Уфимский нефтяной технический университет.
Область научных интересов – возобновляемые источники электроэнергии, электропривод.
hakimyanovmi@gmail.com

Ху Сяоян
Доктор технических наук, профессор кафедры систем наведения и автоматического управления.
Шэнянский политехнический университет (КНР).
Область научных интересов – исследование автоматических систем наведения и управления ракетами.
Xiaoyang_hu@163.com

Худайбердина Алсу Рифовна
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники, инженер лаборатории робототехники Инженерной школы ГУАП.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – программирование, машинное обучение.
alsu.hudaiberdina@mail.ru

Чернышева Ольга Борисовна
Старший преподаватель кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – надежность, электрический привод, силовая электроника.
olgchern@mail.ru

Чубраева Лидия Игоревна
Доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заведующая лабораторией электроэнергетики ИЭЭ РАН, главный научный сотрудник ИХС РАН.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН. Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН.
Область научных интересов – фундаментальные и прикладные исследования в области общепромышленной и специальной электроэнергетики; электромеханики; систем накопления энергии; сверхпроводниковых преобразователей энергии; электромагнитных, электромеханических и теплофизических процессов в электротехнических системах; функциональных материалов для низкотемпературных преобразователей и накопителей энергии.
lidiach@mail.ru

Шамиев Мурат Фихратович
Аспирант.
Ташкентский государственный технический университет.

Область научных интересов – электропривод и автоматизация промышленных установок, электромобиле строение, силовая и микроэлектроника.
Hellomurat2013@gmail.com

Ширяев Василий Николаевич
Старший научный сотрудник.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Область научных интересов – низкотемпературная плазма, плазмохимические установки, ультрадисперсные материалы.
rc@iperas.nw.ru

Шишлаков Владислав Федорович
Доктор технических наук, профессор, директор Института киберфизических систем.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – синтез нелинейных систем автоматического управления с различными видами модуляции сигнала.
shishlakov@guap.ru

Шишлаков Дмитрий Владиславович
Кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – многосвязные системы автоматического управления.
Fleitahd@gmail.com

Шумков Ефим Георгиевич
Студент кафедры информационной безопасности.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, информационные системы.
Efim-999@yandex.ru

Яушкина Мария Дмитриевна
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – разработка системы управления мобильных модульных роботов.
qwertyannq@gmail.com

Яцун Светлана Михайловна
Доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой медико-биологических дисциплин, оздоровительной и адаптивной физической культуры.
Курский государственный университет.
Область научных интересов – реабилитация, механотерапия, CPM-терапия, нейрореабилитация.
mbd155@mail.ru

Яцун Сергей Федорович
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – системы автоматического управления, вибромашины, человеко-машинные системы.
teormeh@inbox.ru

Яшин Антон Николаевич
Ассистент.
Уфимский нефтяной технический университет.
Область научных интересов – возобновляемые источники электроэнергии, электропривод.
Anton.yashin.2012@mail.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ **3**

Бадика Е. М., Зырянов Д. А., Бобрышов А. П., Кузьменко В. П. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБУЧЕНИЯ ДОМАШНЕГО ГОЛОСОВОГО АССИСТЕНТА, ПОСТРОЕННОГО НА БАЗЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ 3

Беззатеева В. С. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И НОРМАТИВНО-ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ ЗАЩИТЫ ДЕТЕЙ ОТ НЕЖЕЛАТЕЛЬНОГО КОНТЕНТА 8

Березкин Д. А., Ганьшин Ю. А. КОНЦЕПЦИЯ ЕДИНОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ СЕТИ СВЯЗИ ВНУТРИ СТРАНЫ 11

Березкин Д. А., Ганьшин Ю. А. КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ В СТРАНЕ 14

Бухвалов П. С., Воронов А. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ КОРРЕКТНОСТИ МЕДИЦИНСКИХ ДИСТОРСИОГРАММ 18

Дашевский В. П., Солёный С. В., Рысин А. В., Гарматий Н. И., Павлюков Д. А. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ И СТАНДАРТОВ СИСТЕМ РЕЧЕВОГО ОПОВЕЩЕНИЯ 23

Елина Т. Н. РАНЖИРОВАНИЕ ПРОЕКТОВ ПО ФОРМИРОВАНИЮ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ПРЕДПРИЯТИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ПОЛЕЗНОСТИ 30

Елтышева И. В., Романова М. С., Елтышев Б. К. ЭВОЛЮЦИЯ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ 33

Зырянов Д. А., Солёный С. В., Бадика Е. М., Бобрышов А. П., Кузьменко В. П. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ И РЕШЕНИЯ ОЧЕРЕДИ С ПРИОРИТЕТАМИ 37

Коломойцев В. С., Альмухамедов А. И. АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧИ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПО РИСУНКУ ВЕН ЛАДОНИ 42

Коломойцев В. С., Грузденков Г. А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ XZ-АРХИВАЦИИ В МЕТОДЕ МНОГОУРОВНЕВОГО ДОСТУПА К ДОКУМЕНТАМ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА 46

Мыльников В. А. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПОИСКА УЯЗВИМОСТЕЙ В ИСХОДНОМ КОДЕ НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ 51

Мыльников В. А., Елина Т. Н. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА УЯЗВИМОСТЕЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ 55

Потапов А. А., Афанасьева А. В. ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ, ВНЕДРЕННЫХ В ОБЛАСТЬ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ 60

Рындюк В. А. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ АУДИТА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ БАНКОВСКОЙ СИСТЕМЫ 65

Светлов Д. А., Налегаев С. С. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ И ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В АВТОМОБИЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ 68

Сергеев А. М., Самохина Е. В. ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ONLINE-МОНИТОРИНГА 74

Фаткиева Р. Р., Судаков А. С. МЕТОД ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ДИНАМИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЕМ ХАРАКТЕРИСТИК КОПИРОВАНИЯ 78

Филист С. А., Кузьмин А. А., Хуссейн Алавси Х. А., Песок В. В. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ КАРДИОРЕСПИРАТОРНОГО СИНХРОНИЗМА 82

Фомичева С. Г. ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ ЦЕНТРОВ БЕЗОПАСНОСТИ И СООТВЕТСТВИЯ ТРЕБОВАНИЯМ 86

Фомичева С. Г., Шумков Е. Г., Курушин Д. А., Михеев И. С. АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМ ИНВЕНТАРИЗАЦИИ И МОНИТОРИНГА ИНФОРМАЦИОННЫХ АКТИВОВ С СИСТЕМАМИ ИДЕНТИФИКАЦИИ И АДМИНИСТРИРОВАНИЯ 92

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА 96

Гречкин Н. Л., Ватаева Е. Ю., Шишлаков Д. В. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ЛИНЕЙНЫХ САУ ОБОБЩЕННЫМ МЕТОДОМ ГАЛЕРКИНА 96

Куцулим Д. В., Выграновская А. В., Худайбердина А. Р., Солёный С. В., Белай В. Е., Рысин А. В. ПРОЕКТИРОВАНИЕ УЧЕБНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ 99

Мартынов А. А., Чернышева О. Б., ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСОВ ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС 106

Мельников С. Ю. КОНЦЕПЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ 112

Решетникова Н. В., Тимофеев С. С., Ватаева Е. Ю., Статкевич А. В. УСТАНОВИВШАЯСЯ ОШИБКА В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ 116

МЕХАТРОНИКА И ВИБРАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 119

Афонин Д. В., Печурин А. С., Яцун С. Ф. КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТИЗИРОВАННОЙ БУКСИРОВОЧНОЙ СИСТЕМЫ 119

Безмен П. А., Алябьев М. О. ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ ПРИ ПОМОЩИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ 126

Князев А. А., Федоров А. В., Яцун С. Ф. МЕТОД КОНТРОЛЯ СИЛ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТОПЫ И ПЛАТФОРМЫ ПРИБОРА ДЛЯ АКТИВНО-ПАССИВНОЙ МЕХАНОТЕРАПИИ ГОЛЕНОСТОПНОГО СУСТАВА 131

Коробчук М. В., Веригин А. Н. МЕХАТРОННЫЕ ВИБРАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ В ПРОЦЕССАХ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ 134

Мальчиков А. В., Лушников Б. В. РОБОТИЗИРОВАННОЕ УСТРОЙСТВО ПОДЛЕДНОГО МОНИТОРИНГА ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ 140

Савельева Е. В., Локтионова О. Г., Политов Е. Н. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ 145

Яцун А. С., Никулин Я. С., Логунов Е. Р. ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭКЗОСКЕЛЕТНЫХ СИСТЕМ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ 149

Яцун С. М., Рукавицын А. Н. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИОННОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ С СИМУЛЯТОРОМ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ 155

ЭЛЕКТРОПРИВОД, ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ 164

Бодылев А. С., Яшин А. Н., Конев А. А., Хакимьянов М. И. О МЕТОДАХ КОНТРОЛЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СКВАЖИННЫХ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ НАСОСОВ 164

Иванов М. Д., Соловьев Б. А., Хазиева Р. Т. РАЗРАБОТКА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА 170

Мухаметшин А. В., Хазиева Р. Т. РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ИСПЫТАНИИ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ 174

Pulatov A., Shamiyev M. MODELING OF AN ENERGY EFFICIENT ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE IN THE MATLAB PROGRAM AND IMPLEMENTATION OF ENERGY EFFICIENT TECHNOLOGIES IN PUMPING STATIONS IN THE CITY WATER SUPPLY SYSTEM 177

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ 182

Афанасьев И. С., Налегаев С. С. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ В ОБЛАСТИ РОБОТОТЕХНИКИ 182

Брунов М. С., Ватаева Е. Ю., Гречкин Н. Л., Шишлаков В. Ф. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ САУ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТОЧНОСТИ АППРОКСИМАЦИИ НЕЛИНЕЙНОГО ЗВЕНА 186

Булатов В. В., Владимиров Р. А. СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ О НЕИСПРАВНОСТЯХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ..... 190

Бурковский В. Л., Ткалич С. А., Ткалич А. С. СИСТЕМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИОРИТЕТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ..... 194

Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л. СТРУКТУРА ЦЕНТРАЛЬНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ SEMS С ЭЛЕМЕНТАМИ ФОРМИРОВАНИЯ ПСИХИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ..... 198

Гречкин Н. Л., Амплеева А. В., Ватаева Е. Ю. СИНТЕЗ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ..... 203

Жеребко С. О., Ганьшин Ю. А., Ившин К. А. МЕТОД КОНТРОЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ ЧИСТОТЫ ГАЗА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ MUSUN 210

Замурагин Ю. М., Саламандра К. Б., Саламандра Б. Л. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СБОРКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЛЕНТОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 215

Карпухин Д. Н., Бурковский А. В. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕМ АВТОНОМНОГО ОБЪЕКТА ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ 221

Куцулим Д. В., Рысин А. В., Солёный С. В. УПРАВЛЕНИЕ ПРИВОДАМИ УНИВЕРСАЛЬНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА..... 226

Ляшенко А. Л., Давидович Б. В., РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА С ГОЛОСОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ..... 230

Ляшенко А. Л., Соколова К. Д. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИРОПА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГАЗИРОВАННЫХ НАПИТКОВ..... 234

Нуйя О. С., Бушуев А. Б., Литвинов Ю. В., Бойков В. И., Сержантова М. В. АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ РЕКУПЕРАЦИИ 238

Сержантова М. В., Бойков В. И., Рудаков Р. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ..... 247

Сержантова М. В., Сериков С. А., Григорьев Г. К. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МУЛЬТИРОТОРНОГО БЕСПИЛОТНИКА, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕГО В СОСТАВЕ ГРУППЫ, И ВОЗМОЖНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОПТИМИЗАЦИИ МАРТС 251

Сяоян Х., Перлюк В. В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА 257

Таболин И. И., Кузьменко Р. Ю., Данилов А. Д. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ АППАРАТУРЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ БОРТОВОЙ СЕТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА..... 266

Шишлаков В. Ф., Положенцев Д. С., Михайлова А. А., Куликова Т. Д. МЕТОД ОЦЕНКИ ПЛАВНОСТИ УГЛОВОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НИЗКОСКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ 275

Яушкина М. Д., Рысин А. В., Солёный С. В. КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА..... 280

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА 283

Ветлицын М. Ю., Ветлицын Ю. А. ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАЩИТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА 283

Выграновская А. В., Карпов Е. И., Павлюков Д. А., Буйчик Д. Д., Солёный С. В. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ..... 288

Голубков В. А., Ватаева Е. Ю., Федоренко А. Г. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ, НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ И СОСТОЯНИЕ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ..... 294

Епифанцев К. В. РАЗРАБОТКА БЕСКОНТАКТНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ГЕОМЕТРИИ НА КРУГЛОМЕРАХ..... 299

Ершов Д. Ю., Лукьяненко И. Н. МЕТОД РАСЧЕТА КОЛЕБАНИЙ БАЛОК И ПЛАСТИН С ТОЧЕЧНЫМ ОПИРАНИЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ГРИНА 302

Железняк И. Н., Лукичев П. А. ПОСТРОЕНИЕ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK 306

Исаков К. С., Булатов В. В. МОДЕРНИЗАЦИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО СТАНКА ДЛЯ НАМОТКИ ПРОВОЛОКИ 310

Исаков К. С., Камышева Л. В. ПРОДЛЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБОРУДОВАНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВ ПРИ ПОМОЩИ ЛОКАЛЬНОГО ВНЕДРЕНИЯ PDM СИСТЕМ 315

Кудрявцев Н. В., Налегаев С. С. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ 322

Кузьменко Ю. П., Романенко В. В., Бобрышов Д. П., Кузьменко В. П. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЕНСАЦИИ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ 326

Куликовская А. В., Солёная О. Я. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 331

Мартынов А. А. К ВЫБОРУ ТИПА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГРЕБНЫХ ВИНТОВ АТОМНЫХ ЛЕДОКОЛОВ 337

Романова М. С. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ 342

Саксонов И. О., Солёная О. Я. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ МИКРОГЕНЕРАЦИИ 346

Салова И. А. К ВОПРОСУ О ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ УДЕРЖИВАЮЩЕГО МОМЕНТА МАГНИТНОЙ МУФТЫ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ 352

Сержантова М. В., Лебедев Д. К. СОЗДАНИЕ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ ДПТ В ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯХ В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ SIMINTECH 357

Создателева М. Э., Солёный С. В. ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК СИСТЕМЫ 3D-ПЕЧАТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ 360

Софронов А. А., Мартынов А. А. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ШИМ ДЛЯ ТРЕХФАЗНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ 364

Третьяков Н. К., Кузьменко В. П. ПРОЕКТИРОВАНИЕ БОРТОВОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА СКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ 371

Чернышева О. Б., Елтышева И. В. ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЭНТРОПИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 375

ЭЛЕКТРОФИЗИКА 379

Ганьшин Ю. А., Жеребко С. О. МОНИТОР ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА БАЗЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ КАМЕР В ЭКСПЕРИМЕНТЕ «ПРОТОН» 379

Кузенов В. В., Воронина Е. А., Рыжков С. В. МАГНИТНО-ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ И МОЩНЫЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ 383

Леушев Д. В., Булатов В. В., Семенников В. В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ ЛУЧА ЛАЗЕРА ИНКЛИНОМЕТРА ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ, ПОЛУЧЕННОМУ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ МАТРИЦЕЙ 386

Сафронов А. А., Кузнецов В. Е., Дудник Ю. Д., Ширяев В. Н., Васильева О. Б. ГЕНЕРАТОРЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ: КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ, ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ 391

Чубраева Л. И. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ 396

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ 404

Научное издание

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ'23

XVIII Международная конференция по электромеханике и робототехнике 18–19 апреля 2023 г.

Сборник докладов

ISBN: 978-5-8088-1823-1

Ответственные за выпуск:
доктор технических наук, профессор *В. Ф. Шишлаков;*
М. С. Романова

Редакторская подготовка *Е. В. Тороповой*
Компьютерная верстка *А. Н. Колешко*

Подписано к печати 31.03.2023. Дата выхода в свет: 11.04.2023.
Формат 60×84 1/8. Усл. печ. л. 48,8. Уч.-изд. л. 49,5. Тираж 150 экз. Заказ № 100.

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Распространяется бесплатно