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

Посвящается Всемирному дню авиации
и космонавтики

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ’22

XVII Международная конференция по электромеханике и робототехнике 12–14 апреля 2022 г.

Сборник докладов

ГУАП

Санкт-Петербург
2022

УДК 001
ББК 72
З-13

З-13 Завалишинские чтения’22: XVII Международная конференция по электромеханике и робототехнике (СПб., 12–14 апреля 2022 г.): сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2022. 253 с.
ISBN 978-5-8088-1705-0
DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17

Помещенные в сборник доклады отражают весь спектр направлений научных работ, проводимых институтом: 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

Члены программного комитета:

С. В. Беззатеев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий защиты информации ГУАП

А. Ометов – доктор технических наук, профессор, директор центра инженерии связи Технологического университета Тампере, Финляндия

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

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

М. И. Хакимьянов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования предприятий УГНТУ

Х. Джири – заместитель вице-руководителя по исследованиям и международным связям, руководитель исследовательской группы WISLAB кафедры телекоммуникаций Технологического университета Брно, Чехия

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, директор филиала Института электрофизики и электроэнергетики РАН, Москва

УДК 001
ББК 72

ISBN 978-5-8088-1705-0
DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17

© Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 342

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

СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА И ЗАЩИТЫ НЕСОВЕРШЕННОЛЕТНЕГО ОТ ВРЕДОНОСНОГО КОНТЕНТА В СЕТИ ИНТЕРНЕТ

Рассмотрены вопросы обеспечения защиты детей от негативной информации в сети Интернет, возможность разработки комплекса мероприятий по созданию и обеспечению системы непрерывного мониторинга и защиты несовершеннолетних в сети Интернет.
Ключевые слова: *права ребенка, защита детей, безопасность несовершеннолетних, информационная безопасность, безопасное Интернет-пространство, обеспечение безопасности несовершеннолетних в сети Интернет.*

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

A SYSTEM FOR CONTINUOUS MONITORING AND PROTECTION OF MINORS FROM HARMFUL CONTENT ON THE INTERNET

The article describes the issues of ensuring the protection of children from negative information on the Internet, the possibility of developing a set of measures to create and ensure a system of continuous monitoring and protection of minors on the Internet are considered.
Keywords: *safety of minors, information security of minors, safe Internet space, ensuring safety of minors on the Internet.*

Каким образом можно оградить несовершеннолетнего от нежелательного контента? В настоящее время данный вопрос становится все более актуальным, так как в период тотального коронавирусного локдауна потребление онлайн-материалов достигло пика. И сейчас этот тренд только набирает обороты, в связи с эпидемиологической обстановкой в стране все больше детей и подростков вынуждены прибегать к онлайн обучению.

Согласно ст. 63 СК РФ родители имеют право и обязаны воспитывать своих детей. Родители несут ответственность за воспитание и развитие своих детей. Они обязаны заботиться о здоровье, физическом, психическом, духовном и нравственном развитии своих детей. Родители имеют преимущественное право на обучение и воспитание своих детей перед всеми другими лицами. Родители обязаны обеспечить получение детьми общего образования. Родители имеют право выбора образовательной организации, формы получения детьми образования и формы их обучения с учетом мнения детей до получения ими основного общего образования.

Согласно п.1 ст. 65 СК РФ родительские права не могут осуществляться в противоречии с интересами детей. Обеспечение интересов детей должно быть предметом основной заботы их родителей. При осуществлении родительских прав родители не вправе причинять вред физическому и психическому здоровью детей, их нравственному развитию. Способы воспитания детей должны исключать пренебрежительное, жестокое, грубое, унижающее человеческое достоинство обращение, оскорбление или эксплуатацию детей. Родители, осуществляющие родительские права в ущерб правам и интересам детей, несут ответственность в установленном законом порядке.

Согласно п.2 ст. 65 СК РФ все вопросы, касающиеся воспитания и образования детей, решаются родителями по их взаимному согласию исходя из интересов детей и с учетом мнения де-

тей. Родители (один из них) при наличии разногласий между ними вправе обратиться за разрешением этих разногласий в орган опеки и попечительства или в суд.

В соответствии с данными статьями Семейного Кодекса Российской Федерации ограничение и защита ребенка от вредной информации, находящейся в сети Интернет не только право, но в первую очередь обязанность родителей, за нарушение которой может наступить ответственность за ненадлежащее исполнение родительских обязанностей.

В связи с легкодоступностью вредного контента, актуальным видится создание определенного рода ограничения по возрасту. То есть ограничение не во время регистрации, хотя такой вариант не исключен, к примеру, при использовании документа, удостоверяющего личность для регистрации в определенной социальной сети, а подтверждение при каждом новом входе в систему.

Несовершеннолетние и дети школьного возраста обладают школьной картой (карта школьника, либо проездная карта), по которой представляется возможным организовать разграниченный доступ к информации разного уровня.

На данный момент безопасность ребенка в сети возможно обеспечить при помощи функции «родительский контроль», которая является комплексом приложений и программ, которые помогают родителям защитить детей от вредного контента [1, с. 91]. Такого рода инструменты были разработаны для обеспечения работы в Интернете наиболее полезной, продуктивной и безопасной для ребенка, для ограничения малолетнего от того, что может ему навредить в сети Интернет. На данный момент в арсенал инструментов родительского контроля можно отнести различные приложения для телевидения, смартфонов, разного рода «умные» устройства, а также компьютерное обеспечение и многое другое.

В большинстве своем производители такого рода средств защиты заверяют потребителя в сохранности здоровья ребенка (к примеру, ограничение использования гаджетов по времени, фильтрация потребляемого контента при помощи «родительского контроля».

Развитие искусственного интеллекта позволяет совершенствовать механизмы защиты детей. Например, компания Yahoo в 2016 году выпустила инструмент Open NSFW для обнаружения порнографических картинок и их блокировки перед показом на экране гаджетов. Целый ряд компаний, включая Apple и Huawei, работают над нейронными сетями, которые смогут классифицировать вредное изображение всего за десять миллисекунд. Это дает надежду, что в будущем дети будут лучше защищены от опасной информации [2].

В то же время на данный момент все предлагаемые системы родительского контроля – это, по факту, иллюзия безопасности. Например, поисковая система выдаст сайты по запросу с использованием сленговых названий наркотиков: снаффы, снюсы, спайсы, соли, а система родительского контроля в свою очередь, скорее всего, не заблокирует их.

Программы родительского контроля эффективны только для детей дошкольного или раннего школьного возраста. Задача одна: чтобы ребенок столкнулся с негативной информацией как можно позже [3, с. 150].

Для регистрации в большинстве социальных сетей на момент регистрации возраст несовершеннолетнего должен быть больше 13 или 16 лет, однако из без проблем обходят данное ограничение, просто указав более ранний год рождения.

В марте 2020 года в «Тиктоке» появилась функция родительского контроля. Взрослые могут запретить просмотр нежелательных видео и ограничить время пользования приложением, а также сделать аккаунт ребенка приватным или публичным. Независимо от того, настроен ли родительский контроль, пользователи этой социальной сети младше 16 лет не могут отправлять и принимать личные сообщения, проводить трансляции, а их фото или видео могут «лайкать» и комментировать только друзья [4]–[5].

В других социальных сетях внутренних ограничений нет.

Получается, что функция родительского контроля не может в полной мере обеспечить защиту несовершеннолетнего от нежелательного контента или вредной информации, в то время как использование личной карты для доступа к компьютеру, социальной сети или Интернету в целом может обеспечить предоставление только той информации, которая подходит данной возрастной группе.

Безусловно, разработка подобных систем контроля над работой и поведением ребенка в сети Интернет требует совместной работы специалистов в области информационных технологий и юристов, занимающихся вопросами информационного и гражданского права. Возможным вариантом использования идентификационной карты учащегося представляется создание системы постоянного мониторинга действий пользователя (ребенка) в сети, дальнейшая передача такой аудиторской информации (log файла) родителям или учителям. Такая система позволит

непрерывно контролировать действия ребенка в сети. Для этого достаточно доработать существующие браузеры таким образом, чтобы доступ к ресурсам сети Интернет предоставлялся только при наличии карты в устройстве считывания. Этим устройством может быть, например, RFID-считыватель. Информация такого журнала о перемещениях ребенка в сети, безусловно, должна быть надежно защищена и предоставляться только санкционированным пользователям по их запросу. Наличие такого журнала позволит оперативно реагировать на действия ребенка в сети и обеспечит контроль его действий даже в том случае, если он каким-то образом попытается обойти защиту, предусмотренную фильтрами настройки, учитывающими его возраст. Наличие журнала и возможность его анализа с использованием в том числе систем искусственного интеллекта позволит обнаружить нестандартное (особенное) поведение ребенка, выявить его предпочтения и область интересов. Кроме того, использование такой системы непрерывного мониторинга нахождения ребенка в сети может позволить «мягко» направить его любопытство в желаемом направлении, обеспечив тем самым корректное развитие личности. Безусловно, при таком подходе возникают морально-этические вопросы о том, кто и каким образом будет определять, что именно должно быть известно (а что не известно) ребенку, чем он должен интересоваться (а чем нет) и т. д.

Библиографический список

1. *Банщикова С. Л., Гольтяпина И. Ю.* Обязанности родителей по обеспечению информационной безопасности несовершеннолетних детей и административная ответственность за неисполнение обязанности // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. 2018. № 1 (25). С. 95–100.

2. Родительский контроль: защита или подавление. URL: https://vk.com/@vk_mamochki-roditelskii-kontrol-zaschita-ili-podavlenie (дата обращения: 24.01.2022).

3. *Белякова Е. Г., Загвязинская Э. В., Березенцева А. И.* Информационная культура и информационная безопасность школьников // Образование и наука. 2017. Т. 19. № 8. С. 147–162.

4. О защите детей от опасной информации. URL: https://habrahabr.ru/post/208510/ (дата обращения: 26.01.2022).

5. Обеспечение защиты детей от негативной информации в сети. URL: http://slidegur.com/doc/1624163/obespechenie-zashhity-detej-ot-negativnoj-informacii-v-seti (дата обращения: 26.01.2021).

УДК 378.147

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

ПРОБЛЕМЫ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

В данной статье рассматриваются наиболее популярные типы биометрических технологий, которые входят в системы идентификации и аутентификации человека и используются в современных электронных устройствах. Будет предложена альтернативная технология распознавания человека, которая заменит предыдущие типы биометрических технологий.
Ключевые слова: *биометрия, биометрические технологии, биометрические системы идентификации и аутентификации, защита информации.*

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

PROBLEMS OF BIOMETRIC TECHNOLOGIES IN THE MODERN WORLD

This article discusses the most popular types of biometric technologies that are included in human identification and authentication systems and are used in modern electronic devices. An alternative human recognition technology will be proposed, which will replace the previous types of biometric technologies.
Keywords: *biometrics, biometric technologies, biometric identification and authentication systems, information protection.*

В современном мире наиболее востребованы различные системы безопасности. Как правило, использование систем безопасности происходит совместно с электронными устройствами и особое внимание уделяется системе биометрии. Таким образом, будут рассмотрены биометрические технологии и системы.

Биометрическая система возникла из системы Бертильонажа, которая была разработана в 1870 году, и ее основателем был Альфонс Бертильон. Эта система основана на проведении 14 измерений всего тела человека, а большинство этих измерений исходили из длинны выбранной части тела. Но, несмотря на довольно детальный подход к измерениям, эта система оказалась весьма проблематичной из-за того, что в то время не существовало средств автоматизации, связанных с процедурой измерения. Сам процесс измерения занимал довольно много времени и требовал, чтобы измеряющий человек тщательно выполнял и соблюдал этапы измерения. Поэтому метод дактилоскопии заменил эту систему.

Идентификация/аутентификация по отпечатку пальца. Данный тип биометрической системы возник из метода дактилоскопии, и поэтому необходимо упомянуть этот метод в первую очередь. Дактилоскопию стали применять, когда пришли к выводу, что у каждого человека есть уникальный след пальцев и ладоней рук, а точнее узор на коже. Это означает, что предыдущая система Бертильонажа, которая использовалась, стала избыточной и занимала много времени в процессе измерения.

В современном мире на основе дактилоскопии реализован вид идентификации/аутентификации человека по отпечатку пальца в биометрической системе. Основной метод работы заключается в определении вершин и впадин узора кожи, устранении шума с последующим снятием слепка узора. Независимо от выбранных биометрических систем (идентификация или аутентификация), а также методов измерения, выходными данными будут уникальные значения, которые могут быть сформированы в ин-

формационный массив с последующим внесением в базу данных (в случае аутентификации).

Данный тип является наиболее популярным и распространенным во всем мире и применяется во многих фирмах, которые решают использовать дополнительные методы защиты. Также этот тип биометрической системы широко используется в устройствах мобильной связи.

Например, в продуктах Apple ранее использовался сканер отпечатков пальцев «Touch ID». Сканнер является собственной разработкой компании Apple, и акцент был сделан на дизайне конструкции, решения которой должны были компенсировать недостатки биометрической технологии. В конструкцию было включено стекло, которое служило линзой для обозначения границ узора пальца, а также для увеличения детализации узора [1].

Несмотря на свою популярность, эта технология распознавания человека содержит в себе множество недостатков. Сильная зависимость от чистоты кожи и среды, которая отвечает за снятие узора с кожи. Среда и кожа должны быть чистыми, требуется очистить от жира среду, иначе возникнут помехи, которые обеспечат неправильный сбор данных. Этот тип распознавания не может быть применен к людям с физическими недостатками. Если кожа будет физически повреждена, то внесение данных в базу данных или идентификация человека не представляется возможным. Предположение о том, что каждый узор или отпечаток уникален, не имеет никаких научных доказательств. Таким образом, существует вероятность ошибок первого и второго рода, что ставит данный тип распознавания под сомнение. Кроме того, сами устройства, использующие эту технологию, часто повреждаются и быстро выходят из строя. Большинство из этих недостатков присутствовали в сканерах Apple «Touch ID», что привело к решению компании отказаться от них.

Идентификация/аутентификация по голосу. Это один из первых динамических типов в биометрической системе и один из самых ненадежных методов биометрической защиты. Этот тип широко используется в корпоративных центрах в качестве биометрической защиты и активно развивается. На данный момент в качестве основного алгоритма работы можно выделить шаблонные методы распознавания голоса. В качестве параметров определения можно задать интонацию, высоту тона и ритм, а затем сформировать шаблоны-словари. Считается, что относительную уникальность голоса можно определить путем составления словаря речи на этапе аутентификации, а полученные данные сопоставлять со словарем во время идентификации. Стоит отметить, что предположение об уникальности голоса и произношения каждого человека ничем научно не подтверждено. Этот тип чувствителен к оборудованию, зависит от его качества, и результаты могут быть непредсказуемыми в ситуации, когда ввод данных и идентификация происходят на разных оборудованиях. Таким образом, необходимо обеспечить идеальную среду работы для сокращения погрешностей, учитывать уровни шума и методы работы на конкретном оборудовании. Это также наиболее предпочтительный метод (если он доступен) для злоумышленников, чтобы взломать и украсть чужую информацию. Тридцати минут записи разговора цели достаточно, чтобы составить словарь, который будет использоваться для таргетированного взлома. Можно сделать вывод, что такой тип биометрической системы невозможен для корпоративного уровня, который требует высокого уровня защиты. Распознавание человека по голосу должно быть побочным и использоваться в сочетании с другими видами распознавания человека.

Но если этот тип используется не в качестве биометрической защиты, а реализован как побочная функциональность какого-либо программного обеспечения, то в этом случае можно допустить ошибки второго рода. Рынок программного обеспечения с использованием этого типа распознавания человека в качестве функционала очень огромен.

Например, Интернет-сервис потоковой передачи аудио Spotify разработал систему распознавания голосовых данных. Предполагается, что пользователь самостоятельно регистрирует свой профиль и ему присваивается уникальный идентификатор. В данном случае система настроена на анализ человеческой речи при использовании продукта. Система, основываясь на анализе, составляет детализированный профиль человека, начиная от пола и заканчивая текущим настроением. Помимо прочего, система способна анализировать звуки окружения и отличать голос от сторонних звуков. Таким образом, составляется детализированный профиль, который привязан к идентификатору профиля, а все данные заносятся в единую базу данных для дальнейшей работы алгоритмов [2]. В этом случае образуется проблема снежного кома, система накапливает данные и не обезличивает их. Чем больше человек находится в такой системе, тем детальнее составляется слепок человека. При любом случае утечки данных потенциальная жертва может быть проиндексирована в базе данных хакеров, деанонимизирова-

на и взломана на основе сохраненной информации или посредством спуфинга в других сервисах, которые используют аналогичную биометрическую технологию.

Во втором случае рассмотрим систему контроля и управления доступом, которая основана на биометрических данных. Такая система может быть использована в банковском секторе в качестве биометрической защиты. Система использует комбинированную биометрическую систему и анализирует лицо человека в дополнение к голосу. На основе полученных входных данных решает, предоставить ли доступ к чему-либо или нет [3]. Авторы такой системы изначально понимали, что, основываясь лишь только на анализе речи, не обеспечить серьезную биометрическую безопасность. Сама по себе система открыта для возможности спуфинга и требует дополнительного ввода алгоритмов проверки, но базовое решение от авторов является использование комбинированной биометрической системы, которая имеет свои недостатки.

Идентификация/аутентификация по лицу. Данный тип биометрической системы имеет большую популярность в мире и активно внедряется как метод биометрической защиты. Основной алгоритм работы заключается в построении трехмерной модели лица. Производится выбор основных элементов лица с последующими их измерениями, после чего измеряются расстояния между элементами лица. Этот тип распознавания человека хорошо работает с моделями нейронных сетей и позволяет учитывать множественные вариации полученных входных данных и приводить их к стандартному виду. Вариациями, которые считаются шумом, могут быть: разный наклон и поворот головы, разное освещение, выражение лица, наличие волосяного покрова на лице, присутствие посторонних предметов на лице (например, очков).

Основным недостатком этого типа распознавания человека является то, что для него требуется большая мощность оборудования или электронного устройства. Из-за этого нужно придумывать новые решения и способы применения. Сильная зависимость от качества камеры и среды, в которой находится объект. Таким образом, если используются несколько устройств в системе, то необходимо настроить каждое устройство отдельно, подстраивая настройки под текущую среду проверки. Хоть мобильность возможна, но требуются дополнительные функции и решения для устранения шума и ошибок первого, второго рода.

Ранее Samsung использовала данную биометрическую технологию в своих продуктах. Основной принцип разработанной системы состоял в том, чтобы построить модель лица внутри системы, попросив пользователя продукта пройти этапы сканирования лица с помощью датчика камеры. Работа была основана на предположении об уникальности некоторых параметров лица каждого человека. Система сегментировала области лица и, используя базовые алгоритмы, распознавала базовый набор контрольных точек лица исходя из стандартной модели лица человека. В контрольных точках снимались параметры элементов лица, которые считаются уникальными и записывались под оболочку системы. Для идентификации пользователя вводится степень «похожести» и с помощью алгоритмов определяется, насколько проверяемый человек похож на человека с контрольными параметрами лица в системе [4] Данная система была очень плохо настроена, выдавала ошибки первого рода. Но самое главное, что система наглядно продемонстрировала важность внедрения дополнительных алгоритмов проверки и защиты данных, поскольку из-за полного отсутствия таковых система была легко взломана с помощью спуфинга.

Идентификация/аутентификация по радужной оболочке глаза. Данный тип является продолжением биометрической технологии распознавания по сетчатке глаза. Основной метод работы состоит в предположении уникальности ряда параметров для каждого человека, которые присутствуют в радужной оболочке человеческого глаза. Если быть более точным, принцип заключается в трабекулярной сети – образовании, из которого состоит радужка. Считается, что узор, который формируется из трабекулярной сети, является уникальным, и алгоритмы или методы распознавания работают непосредственно с этим узором. Хоть этот тип распознавания является условным продолжением предыдущей технологии, но большинство недостатков перекочевало из старой технологии. В случае распознавания по сетчатке требовался яркий направленный свет, который вызывал как минимум дискомфорт у человека, которого распознавал, но из-за перехода от сетчатки к радужной оболочке глаза яркий направленный свет не является важным условием, для фиксации узора трабекулярной сети по-прежнему требуется высокоточная камера. В дополнение к получению детального изображения требуются еще более точно составленные алгоритмы, которые будут работать с процессом сегментации участков детального изображения. Помимо определения самой радужной оболочки, необходимо определить границы и

исключить различные шумы. Этот тип распознавания человека очень сильно зависит от точности определения границ, и неправильное определение границ может нарушить работу всего данного биометрического типа. В менее точно настроенном программном обеспечении, использующем эту технологию, это может привести к ошибкам первого и второго рода. В любом случае, далее все сводится к различным комплексам методов, подходов идентификации и аутентификации, которые работают с полученным узором.

Изобретение Samsung, которое используется в продуктах этой компании, придерживается основной концепции этой биометрической технологии, но за некоторыми исключениями. Устройство должно иметь блок освещения для передачи направленного света на радужную оболочку человеческого глаза и блок камеры, который принимает данные радужной оболочки с отраженным светом. После этого в работу вступают алгоритмы в устройстве, которые отвечают за удаление шума, определение границ. Руководствуясь алгоритмами, предложенными Дж. Даугманом, происходит сегментация и параметризация данных. Используя алгоритм, аналогичный фильтру Габора, получают фазовую информацию при повышенной четкости и составляется шаблон радужной оболочки. Впоследствии будет проведено сравнение между контрольными параметрами и входными данными [5]–[7]. Основной проблемой данного изобретения является акцент на мобильности и доступности технологии и, как следствие, снижение стоимости производственного процесса. Получается так, что изобретение ограничено дешевыми технологиями, из-за этого алгоритмам выделяется большой диапазон ошибок, которые возникают при низком качестве входных данных. Устройству необходимо адаптироваться к динамичной среде, а вспомогательным защитным алгоритмам требуется использовать дополнительные технологии машинного обучения, которые потребляют излишнюю мощность устройства. В результате допускается большая вероятность ошибок первого рода, и остается лазейка для злоумышленников, которые будут эксплуатировать возможность ошибки второго рода. И все это при относительно длительном процессе распознавания из-за большого количества используемых алгоритмов.

Основываясь на всех вышеперечисленных наиболее популярных биометрических типах распознавания человека, можно выделить основные проблемы. Любой вид биометрического распознавания человека игнорирует факт физического повреждения уникального параметра, из-за которого идентификация и аутентификация могут быть невозможны. Зависимость от среды, в которой происходит распознавание человека, или от мощности оборудования. Необходимо продумать множество методов устранения шума в процессе распознавания на программном уровне или даже физическом. Возможность совершения ошибок из-за множества факторов и, как следствие, это склонение к комбинированной биометрической системе. Сама по себе комбинированная биометрическая система использует уже готовые технологии для распознавания человека, но количество используемых технологий ничем и никем не регулируется. Хотя вероятность потенциальной ошибки распознавания снижается, это влечет за собой неоптимизированный процесс распознавания, реализацию дополнительных алгоритмов и методов. С точки зрения безопасности любой тип биометрии изначально подвержен различным методам спуфинга и содержит в себе множество эксплойтов. Для поддержания уровня безопасности используется набор различных дополнительных методов и алгоритмов, которые защищали бы процесс распознавания, но у этого подхода нет единого стандарта безопасности, что ставит под сомнение саму возможность безопасного процесса распознавания.

В качестве альтернативы текущих наиболее популярных видов технологий биометрической идентификации и аутентификации стоит предложить типирование ДНК (анализ ДНК). Новый тип биометрической технологии, которую можно привести к единому стандарту, а благодаря соблюдению правильного процесса распознавания, можно достичь наивысшей точности идентификации. Данный тип распознавания полностью исключает возможность шума, не зависит от степени повреждения человека, а благодаря новым технологиям можно ускорить процесс идентификации при снижении стоимости реактивов и биоматериала. Этот тип биометрической идентификации имеет высокую вероятность стать автоматизированной технологией, которая может интегрироваться в современное человеческое общество и стать стандартом биометрической системы.

Библиографический список

1. *Fadell A.* Embedded authentication systems in an electronic device: patent no. US9304624B2. 2016.

2. *Stéphane H.* Identification of taste attributes from an audio signal: patent no. US9934785B1. 2018.

3. Патент РФ № 2013111904, 18.03. 2013. Хитров Михаил Васильевич (RU), Егоров Сергей Владимирович (RU); заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «ЦРТ-инновации» (RU). Система контроля и управления доступом на базе биометрических технологий аутентификации личности по голосу и по лицу // Патент России № 2638775.15.12. 2017. Бюл. № 35.

4. *Lee Y., Yoon S.* Mobile device having face recognition function using additional component and method for controlling the mobile device: patent no. US9773158B2. 2013.

5. *Bae K.* Iris recognition device and mobile device having the same: patent no. US20150269419A1. 2014.

6. *Daugman J.* High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence. 1993.

7. *Feichtinger H., Strohmer T.* Gabor analysis and algorithms: theory and applications. 1998.

УДК 378.147 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-11-15**

Н. А. Богачева*
ведущий программист
А. Д. Жуков*
кандидат технических наук, доцент
А. П. Куст*
бакалавр
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

В статье рассмотрена концепция оперативного определения состояния дорожного покрытия, которое привязывается к слою геоинформационной системы. Предлагается превратить каждый находящийся в движении автомобиль в постоянно действующую лабораторию. Для решения указанной задачи предлагается использовать трехмерную модель движения автомобиля и достаточно стабильные характеристики коэффициента сцепления в функции скольжения в тормозном и разгонном режимах.
Ключевые слова: *дорожное покрытие, коэффициент трения скольжения, модель движения автомобиля, шина CAN, геоинформационная система.*

N. A. Bogacheva*
Leader Programmer
A. D. Zhukov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. P. Kust*
Undergraduate
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

PAVEMENT FRICTION MONITORING SYSTEM

The article discusses the concept of the operational determination of the state of the road surface, which is tied to the layer of the geographic information system. It is proposed to turn every vehicle in motion into a permanent laboratory. Currently, most cars have an on-board CAN bus, the data from which allows calculating the currently realized sliding friction coefficient and identifying the current maximum sliding friction coefficient. To solve this problem, it is proposed to use a three-dimensional model of vehicle motion and fairly stable characteristics of the coefficient of adhesion as a function of sliding in braking and accelerating modes. The monitoring system includes the following subsystems: collection of operational information, wireless transmission of information to intermediate base stations, transmission of information from intermediate base stations to the central station, information processing at the central station.
Keywords: *road surface, coefficient of sliding friction, vehicle movement model, CAN bus, geographic information system.*

Постановка задачи

В условиях плохого состояния дорожного покрытия (дождь, снег, гололед) при снижении коэффициента трения достаточно сильно увеличивается величина тормозного пути автомобиля, что повышает количество дорожно-транспортных происшествий. В статье предлагается концепция оперативной оценки состояния дорожного покрытия (текущего коэффициента трения скольжения), которое привязывается к слою геоинформационной системы – ГИС (например, Яндекс-карте).

Для определения коэффициента трения как в нашей стране, так и за рубежом в настоящее время используются специальные лаборатории [1]. Авторы предлагают превратить каждый находящийся в движении автомобиль в постоянно действующую лабораторию, так как в настоящее время большинство автомобилей имеет бортовую шину CAN, данные с которой позволяют вычислить текущий реализуемый коэффициент трения скольжения и идентифицировать текущий максимальный коэффициент трения скольжения. В итоге водители автомобилей получают карту, аналогичную карте «Яндекс-пробки», но с информацией о степени скользкости дороги. Это приведет к повышению безопасности дорожного движения, да и к увеличению дорожного трафика. При этом городские дорож-

ные службы в режиме реального времени будут снабжаться информацией о состоянии уборки дорог, о дорогах, требующих быстрейшей уборки, а также об эффективности этой уборки.

Структура системы мониторинга

Структура системы мониторинга состояния фрикционных свойств дорожного покрытия представлена на рис. 1.

На рис. 1 показаны три автомобильных передатчика (А1-А3), которые по каналам связи связаны с базовыми станциями (Б1-Б4), связанными с сервером (С), на котором происходит обработка всей информации, формирование слоя ГИС и его актуализация.

Система мониторинга включает в себя следующие подсистемы:

- сбора оперативной информации, расположенная на автомобиле;
- беспроводной передачи информации на промежуточные базовые станции;
- передачи информации от промежуточных базовых станций на центральную станцию;
- обработки информации на центральной станции, которая в свою очередь состоит из нескольких субсистем:
- оперативная идентификация состояния автомобиля;
- обработка информации, полученной от автомобиля (оценка состояния дорожного покрытия);
- оперативная поддержка слоя ГИС.

В субсистеме «Идентификация автомобиля с привязкой к ГИС» выполняются две задачи: выделение данных о функционировании систем конкретного автомобиля из входного потока данных и привязка автомобиля к ГИС.

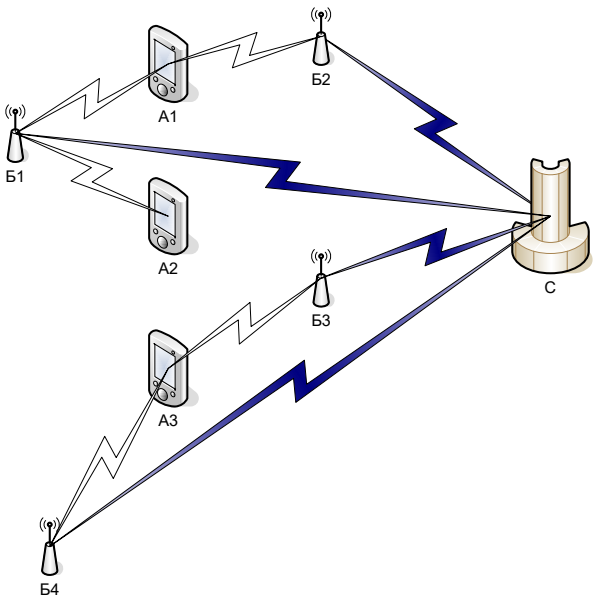


Рис. 1. Структура системы мониторинга

В субсистеме «Обработка информации, полученной от автомобиля» выполняются следующие задачи: уточнение математической модели динамики идентифицируемого автомобиля; нахождение реализуемого коэффициента трения; сравнение вычисленного реализуемого коэффициента трения с располагаемым коэффициентом трения, определенным в данной точке пространства; при необходимости – обновление значения располагаемого коэффициента трения. При решении задачи идентификации коэффициента трения в данной точке пространства с учетом персонификации автомобиля и актуального значения располагаемого коэффициента трения вычисляется суммарная сила, действующая на автомобиль. Далее вычисляются аэродинамическая сила лобового сопротивления автомобиля, аэродинамическая подъемная сила, сила тяги двигателя, проводится идентификация реализуемого коэффициента трения и при необходимости обновляется значение располагаемого коэффициента трения, которое сохраняется в системе.

Таким образом, каждый автомобиль становится своеобразным измерительным устройством, корректирующим значение текущего коэффициента трения в конкретной точке пространства.

Понимая, что погрешность идентификации может быть велика, особенно в случае многополосного движения, при реализации мониторинга предлагается ввести «релейный канал», по которому на ГИС наносятся участки дороги, где зафиксированы сработки антиблокировочных и (или) противобуксовочных систем, а также систем путевой устойчивости. Кроме этого, нам кажется целесообразным информирование водителей и дорожных служб о рекомендуемой скорости движения «здесь и сейчас».

Одной из проблем является ограниченность трафика данных при очень большом количестве транспортных средств. Для решения этой проблемы предлагается непрерывный мониторинг без увеличения трафика данных с транспортных средств благодаря использованию канала множественного доступа, допускающего частичную потерю информации, подробно изложенный в [2], [3]. Это позволит существенно повысить оперативность получения указанной выше информации.

Идентификация коэффициента трения

В настоящее время большинство автомобилей имеет бортовую шину CAN, которая в зави-

симости от оснащенности имеет следующие параметры:

- приведенную скорость движения автомобиля;
- угловые скорости колес (рис. 2);
- боковое и продольное ускорения центра масс автомобиля;
- скорость рыскания;
- угол поворота рулевого колеса;
- скорость поворота рулевого колеса;

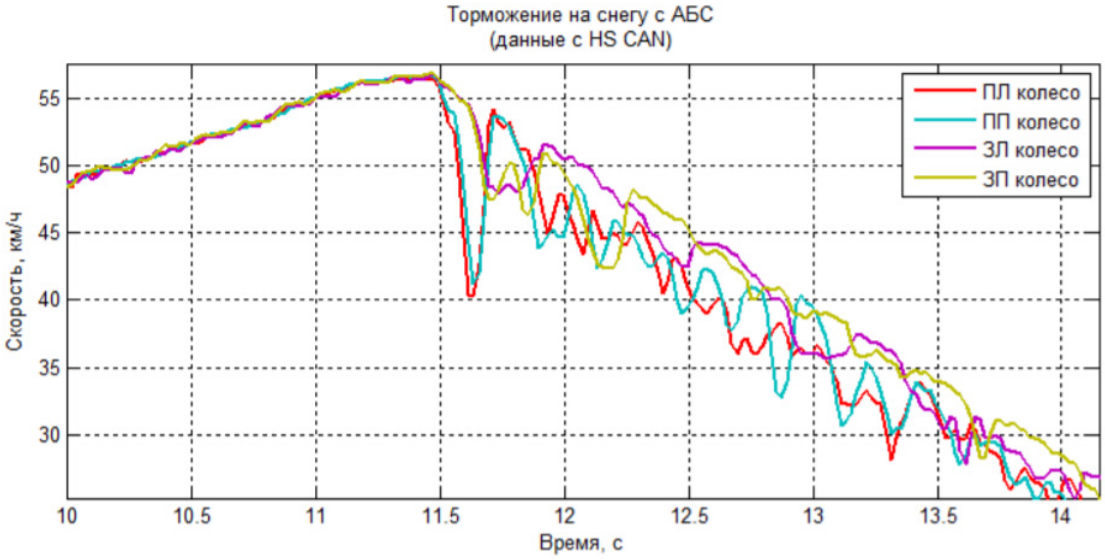


Рис. 2. Пример записи скоростей колес с HS CAN автомобиля LR Discovery3

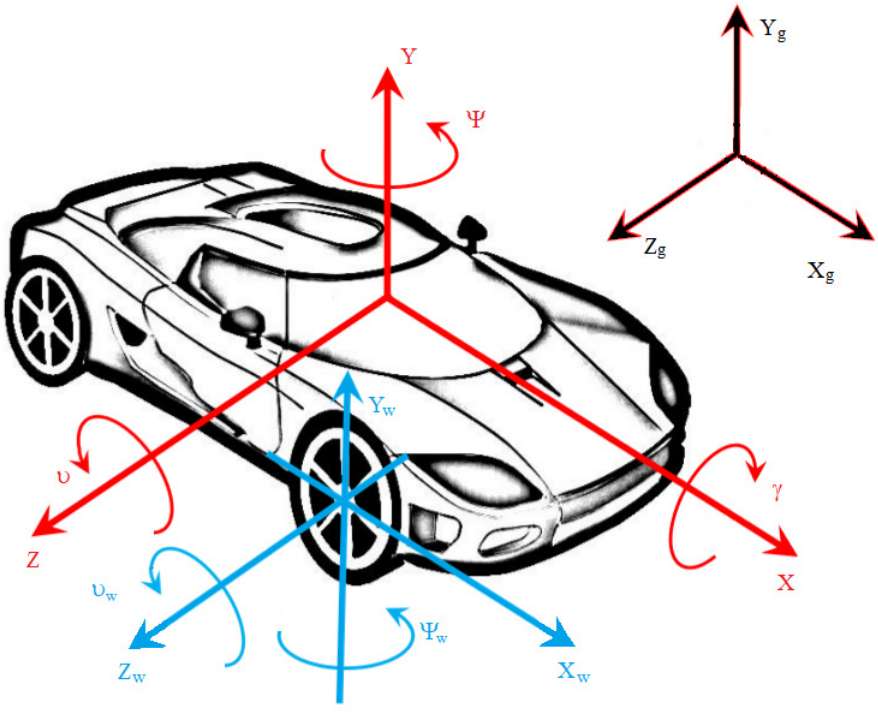


Рис. 3. Степени свободы модели автомобиля: X, Y, Z – оси связанной системы координат; X_W, Y_W, Z_W – оси систем координат, связанных с центрами колес автомобиля; X_g, Y_g, Z_g – оси земной системы координат; g – угол крена; и – угол тангажа; Y – угол рысканья; u_W – угол поворота колеса относительно оси Z_W; Y_W – угол поворота управляемого колеса относительно оси Y_W

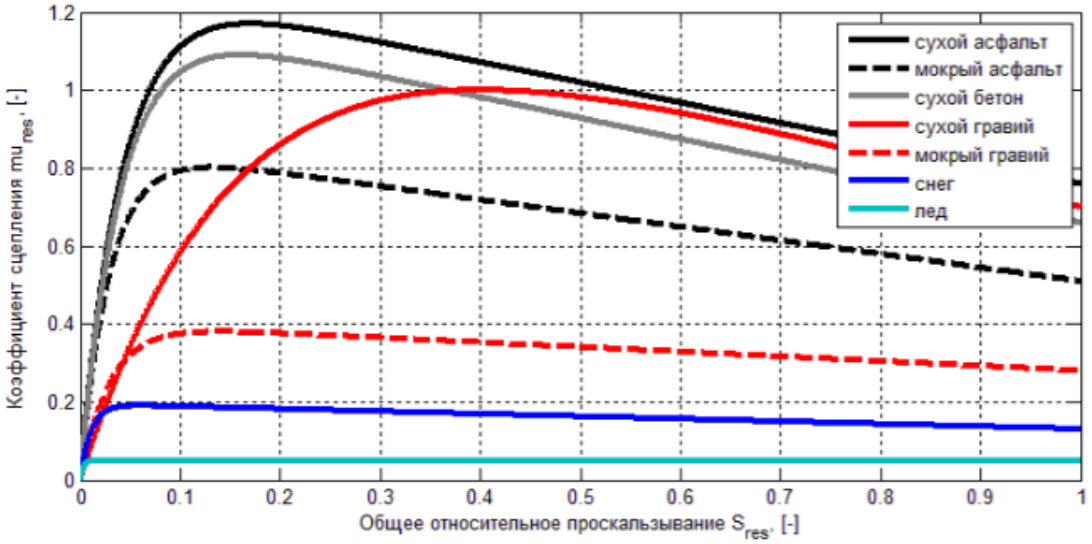


Рис. 4. Характеристики коэффициента сцепления

- положение педали газа;
- положение педали тормоза;
- обороты ДВС;
- значения датчиков высоты системы подрессоривания для определения кренов кузова.

Используя эти данные, можно вычислить текущий реализуемый коэффициент трения скольжения и идентифицировать располагаемый коэффициент трения скольжения. Для решения указанной задачи предлагается использовать трехмерную модель движения автомобиля с 18 степенями свободы, подобную описанной в [4] (рис. 3). Подобного рода модели применительно к наземному движению самолетов ранее разработаны авторами [5], [6].

Для идентификации располагаемого коэффициента трения предлагается воспользоваться достаточно стабильными характеристиками коэффициента сцепления [4], для режима торможения, представленные на рис. 4.

При создании математической модели динамики движения транспортного средства наиболее важной задачей является достаточно детальное описание физики взаимодействия пневматической шины с опорной поверхностью для определения реакций, действующих в пятне контакта [7], [8].

Для режима разгона будут использованы аналогичные по виду характеристики, представленные, например, в [9].

Заключение

Оперативное определение состояния дорожного покрытия (текущего коэффициента трения скольжения), которое привязывается к слою ГИС, позволяет вычислять текущий реализуемый коэффициент трения скольжения и идентифицировать располагаемый коэффициент трения скольжения, используя данные с бортовой шины CAN, имеющейся на большинстве автомобилей.

Предлагается непрерывный мониторинг без увеличения трафика данных с транспортных средств благодаря использованию канала множественного доступа, допускающего частичную потерю информации.

Библиографический список

1. Справочная энциклопедия дорожника. Т. 2. Ремонт и содержание автомобильных дорог / Под ред. А. П. Васильева. М.: Информавтодор, 2004. 1129 с.

2. *Foss S., Turlikov A., Grankin M.* Spatial random multiple access with multiple departure // 2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2017. P. 2728–2731.

3. *Borisovskaya A., Glebov A., Turlikov A.* Estimation of average delay in systems with unsourced random access and multiple departure // 2021 XVII International Symposium «Problems of Redundancy in Information and Control Systems» (REDUNDANCY). IEEE, 2021. P. 28–33.

4. *Шадрин С. С.* Методология создания систем управления движением автономных колесных транспортных средств, интегрированных в интеллектуальную транспортную среду. М.: МВТУ, 2017. 400 с.

5. *Богачева Н. А., Жуков А. Д.* Моделирование движения самолета по земле в среде Simulink // Нели-

нейные колебания механических систем: VII Всероссийская научная конференция. Нижний Новгород, 2005. С. 48–50.

6. *Bogachieva N., Zhukov A., Zhukov S.* Description of airplane landing intellectual monitoring unit iABS // International symposium on problems of redundancy in information and control systems. 2009.

7. *Шадрин С. С.* Методика расчетной оценки управляемости и устойчивости автомобиля на основе результатов полигонных испытаний. М.: МАДИ, 2009. 132 с.

8. *Kiencke U., Nielsen L.* Automotive Control Systems for Engine, Driveline, and Vehicle (Second Edition). Berlin: Springer. Verlag Heidelberg, 2005. 512 p.

9. *Genta G., Morello L.* The Automotive Chassis. Volume 1: Components Design. S. l.: Springer. Science+Business Media B. V., 2009. 633 p.

УДК 001.814.2

И. А. Воропаев*
ассистент
М. В. Ляхнов*
студент
Г. И. Бадретдинова*
студентка
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ НАУЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ БИБЛИОТЕК

Рассмотрены научные электронные библиотеки, принцип их работы, количество хранимой научной литературы, способы ознакомления с ней. Также разобраны алгоритмы работы и сортировки научных поисковых систем в русифицированной части Интернета.
Ключевые слова: *электронная библиотека, поиск информации, наука, электронный ресурс, Интернет.*

I. A. Voropaev*
Assistant
M. V. Lyakhnov*
Student
G. I. Badretdinova*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

COMPARATIVE ANALYSIS OF RUSSIAN SCIENTIFIC ELECTRONIC LIBRARIES

Considers scientific electronic libraries, the principle of their operation, the amount of scientific literature stored, and ways of getting acquainted with it. The scientific search engines in the Russified part of the Internet also analyzed.
Keywords: *electronic library, information search, science, electronic resource, Internet.*

Интернет – огромное хранилище самой разной информации, которая дополняется и обновляется каждую секунду. Любой компьютер, имеющий соединение с Интернетом, является одной из множества ячеек в этом хранилище. В такой глобальной сети всегда можно найти нужную нам информацию по соответствующей тематике. Самое сложное в работе с Интернетом – найти централизованную информацию, отвечающую нашим интересам. Проблема заключается в том, что в глобальной сети информация расположена в хаотичном порядке, каждый день создается все новые сервера, поэтому вопросы поиска информации являются наиболее актуальными в современном мире. Выход в этой ситуации был решен с помощью внедрения различных современных компьютерных комплексов. Это привело к тому, что в глобальной сети произошли положительные изменения в организации электронных ресурсов. Хранение и обеспечение доступа к информационным ресурсам также улучшилось. Для организации и последующего поиска конкретной информации были созданы специализированные электронные библиотеки.

Электронная библиотека – это упорядоченное собрание различных электронных документов, таких как книги, газеты, журналы. Оно снабжено специализированными средствами навигации и поиска информации. Электронная библиотека – универсальный инструмент, предназначенный для решения широкого спектра поставленных задач. Особое место среди электронных библиотек занимают различные научно-информационные библиотеки. В рамках данной статьи будут рассмотрены именно научные отечественные электронные библиотеки и проведен их сравнительный анализ.

«eLibrary» – крупнейший российский электронный ресурс, содержащий большое количество научных и научно-практических изданий по многим сферам деятельности человека [1]. На текущий момент данная электронная библиотека может предложить читателю на выбор боль-

ше 2 млн выпущенных журналов, порядка 37 млн актуальных статей. С помощью авторского указателя можно найти не только конкретного автора, но также и тематику, число публикаций, цитирований и многое другое. Портал «eLibrary» взаимодействует со всеми вузами России, с ведущими медицинскими организации, с десятками научно-исследовательских центров и институтов, присутствует и большое множество иностранных научных изданий. Такой электронный ресурс имеет важное значение для студентов и аспирантов, для молодых ученых и научных сотрудников, для ребят, заинтересованных наукой, и преподавателей разных учебных заведений. На электронном ресурсе представлены журналы, различные диссертации и патенты, сборники статей, монографии и авторефераты.

«КиберЛенинка» – это открытая научная электронная библиотека, реализованная на концепции распространения знаний в открытом доступе. Этот российский проект вошел в пятерку крупнейших самый открытых научно-образовательных архивов. Данный электронный ресурс обеспечивает бесплатный оперативный полнотекстовый доступ к научным публикациям. На сегодняшний день электронная библиотека насчитывает 2 577 931 научных статей в библиотеке [2]. Научная библиотека позволяет неограниченно использовать тексты статей, но с условием указания авторства. «КиберЛенинка» сотрудничает с издательствами и предлагает следующие условия: повышение цитируемости и узнаваемости издания, бесплатное размещение некоммерческих изданий, необходимость размещения описания и полных текстов статей в сети Интернет в свободном доступе. Тем самым портал интересен преподавателям, студентам, ученым, специалистам и любителям науки [3]. «КиберЛенинка» позволяет оперативно получать информацию, обеспечивает постоянный доступ к ней и предоставляет полные тексты документов. Но есть один недостаток портала: статьи не представлены в хронологическом порядке.

Научная библиотека им. Максима Горького [4] – открытая электронная библиотека, созданная при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета. Этот электронный ресурс предоставляет доступ к более чем 60 млн электронных источников, включая научную периодику, монографии, диссертации, справочные издания, статьи и другую публикуемую информацию. Для всех посетителей разрешено частичное копирование (полное копирование статей допускается только авторам). Поиск осуществляется по ключевым словам, автору, заглавию, году издания, типу издания (диссертации, сборники, статьи, книги, различные научные издания).

Библиотека РФФИ (РФФИ – российский фонд фундаментальных исследований, далее – Фонд). Портал предоставляет доступ к научным статьям, выпущенным при его поддержке. Все труды отсортированы по предметной области и по содержанию фраз в тексте. Электронная библиотека содержит в себе: электронные версии отдельных произведений научной литературы, авторы которых являются победителями конкурса издательских проектов РФФИ, научно-популярные статьи и фотоматериалы, написанные в рамках проектов РФФИ, аннотированные отчеты по проектам РФФИ, журнал «Вестник Российского фонда фундаментальных исследований», который издается ежеквартально и включен в перечень рецензируемых научных изданий ВАК – высшей аттестационной комиссии (информация об изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования), журнал «Вестник РФФИ. Гуманитарные и общественные науки» – это уникальное полидисциплинарное издание, в котором публикуются статьи по всему спектру гуманитарных наук: по отечественной истории с древнейших времен до наших дней, всеобщей истории, археологии, этнографии, экономике, философии, социологии, политологии, правоведению, науковедению, литературоведению, языкознанию, искусствоведению, комплексному изучению человека, психологии, педагогике, социальным проблемам здоровья и экологии человека, глобальным проблемам и международным отношениям, в журнале печатаются ранее не публиковавшиеся научные статьи, которые подготовлены по итогам или в ходе выполнения научных проектов и мероприятий, поддержанных Фондом, с декабря 2015 года журнал включен в состав базы данных Russian Science Citation Index (RSCI – Российский индекс научного цитирования) на платформе Web of Science.

Библиотека по естественным наукам РАН – российской академии наук (БЕН РАН) – в настоящее время этот электронный ресурс возглавляет одну из самых крупных и наиболее развитых централизованных библиотечных систем России, являясь важнейшим звеном академической системы научной информации по естественным наукам. В состав ЦБС БЕН РАН – Централизованной библиотечной системы библиотеки по естественным наукам РАН – входит огромное количество библиотек (51 из которых является отделами БЕН РАН), которые обслуживают порядка 150 академических институтов, различные научно-исследовательские ин-

Таблица 1

Результаты сравнительного анализа электронных библиотек

Критерий	«eLiBrary»	«КиберЛенинка»	«Научная библиотека им. М. Горького»	«Библиотека РФФИ»	«БЕН РАН»
Полнота поиска (Д)	902911,2	130139,2	24224	0	50,4
Место (полнота поиска)	1	2	3	5	4
Среднее количество пертинентных документов (РД2)	6,8	10	9,2	0	9,8
Среднее количество частично пертинентных документов (РД1)	2,4	0	0,8	0	0,4
Среднее количество непертинентных документов (РД0)	0,8	0	0	0	0
Коэффициент точности поиска (Р)	0,9	1	9,6	0	1
Место (точность поиска)	3	1	2	4	1
Коэффициент поискового шума (S)	0,1	0	0,4	0	0
Рейтинг (R)	2,4	4,6	2,8	4,4	5,8

ституты и региональные научные центры (например, Пущинский, Черноголовский и Троицкий научные центры). Библиотеки ЦБС БЕН РАН располагают богатейшими фондами литературы по естественным наукам, которые включают в себя больше 15 млн экземпляров книг, журналов и продолжающихся изданий, в том числе 5 млн иностранных. Эта электронная библиотека дает доступ всем посетителям, которые желают получить ту или иную информацию и знания в области естественных наук.

Рассмотрев пять научных электронных библиотек, проанализируем их работу по нескольким критериям:

- полнота поиска;
- среднее количество пертинентных документов;
- коэффициент точности поиска;
- коэффициент поискового шума.

Из данных табл. 1 можно сделать вывод, что каждая из представленных электронных библиотек имеет свои сильные и слабые стороны. Однако по отдельным факторам (таким как полнота и скорость поиска того или иного научного материала) можно заметить, что научная электронная библиотека «eLiBrary» является наиболее информативной и практичной.

Библиографический список

1. Научная электронная библиотека «eLibrary». URL: https://elibrary.ru/defaultx. asp (дата обращения: 22.10.2021).

2. Научная электронная библиотека «Киберленинка». URL: https://cyberleninka.ru/ (дата обращения: 22.10.2021).

3. Российский фонд фундаментальных исследований. URL: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/library (дата обращения: 22.10.2021).

4. Научная библиотека им. М. Горького. URL: https://library. spbu.ru/ru/ (дата обращения: 22.10. 2021).

УДК 004.056.53+004.056.57

И. А. Воропаев*
ассистент
М. В. Ляхнов*
студент
Д. С. Гатаев*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРИНЦИП РАБОТЫ СИММЕТРИЧНОГО ШИФРОВАНИЯ

Рассмотрены современные технологии кодирования и раскодирования данных, история их создания, принципы и методы их работы, а также виды этих технологий, способы применения, рассмотрен вопрос о безопасной передаче сообщений в Интернете.
Ключевые слова: *шифрование, дешифровка, алгоритмы, криптография, Интернет.*

I. A. Voropaev*
Assistant
M. V. Lyakhnov*
Student
D. S. Gataev*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

OPERATING PRINCIPLE OF SYMMETRIC ENCRYPTION

Discusses modern technologies for encoding and decoding data, the history of their creation, the principles and methods of their work, as well as the types of these technologies, methods of application, and the issue of secure transmission of messages on the Internet.
Keywords: *encryption, decryption, algorithms, cryptography, Internet.*

Шифрование в той или иной форме существовало с древности. Когда-то шифрование информации было только прерогативой военных и политических структур. Передача распоряжений, тактики, заключение союзов, альянсов и огромное количество информации, которая никак не должна была оказаться в руках врага, привели к возникновению тайнописи. Шифрование возникло приблизительно в 4 тыс. до н. э.

Первое устройство для шифрования изобрели приблизительно в V веке в Спарте. Это была палочка, имеющая определенный диаметр, на которую наматывали лист пергамента. Запись букв происходила вдоль оси палочки. Для того чтобы прочитать такого рода письмо, нужна была палочка точно такого же диаметра. Этот метод стал именоваться шифром простой перестановки. В Риме в IV веке также изобрели устройство, состоящее из двух дисков, которые в свою очередь насаживались на ось, на каждом из которых были нанесены буквы алфавита в случайном порядке. С помощью таких устройств реализовали шифр простой замены. У Юлия Цезаря также был свой шифр, в котором каждая буква исходного текста заменялась буквой, стоящей на некоторое фиксированное число мест дальше в алфавите. Древние греки же зашифровывали свои сообщения, послания при помощи инструмента под названием «скитала». Германия для защиты военных и дипломатических сообщений в ходе Второй мировой войны использовала свою знаменитую шифровальную машину «Энигма».

Шифрование – технический процесс, в ходе которого информация преобразуется в секретный код, скрывая и защищая таким образом данные, которые вы отправляете, получаете или храните. Зашифрованные данные – это результат применения алгоритма для кодирования данных с целью сделать их недоступными для чтения. Применяется такой алгоритм кодирования данных, чтобы только сторона-получатель, имеющая ключ дешифрования, могла расшифровать их. Расшифрованное сообщение, содержащееся в нешифрованном файле, называется открытым (публичным) текстом, а сообщение в зашифрованном виде – зашифрованным текстом. Шифрование данных – это универ-

сальное защитное решение [1]: оно может применяться к части данных, например, к паролю, к информации в файле или даже ко всем данным, содержащимся на носителе.

Современный мир – мир невообразимых технологий и изготовленных на их базе изобретений. То, что десятки назад было лишь в фантазиях футурологов и писателей-фантастов, на данный момент является реальностью. Появляясь в геометрической прогрессии открытия каждый год приносят что-то новое во все основные сферы интересов человечества. Большинство пользователей не знают, что множество информации уже защищается при помощи технологии шифрования. Например, Интернет-банкинг и онлайн-магазины не работали бы без хорошего шифрования. Шифрование предназначено для защиты средств и личной информации. В корпоративной среде шифрование следует использовать для защиты интеллектуальной собственности и инновационных разработок компании. Современные методики шифрования прошли огромное количество стадий усовершенствования и доработок.

Процесс шифрования становится возможным благодаря криптографическим ключам в совокупности с разными математическими алгоритмами [2]. Чтобы понять принципы работы шифрования в Интернете, разберемся с двумя основными типами шифрования – симметричным и асимметричным.

• Симметричное представляет собой криптографический ключ для шифрования и дешифрования данных (кодирования и восстановления информации). Это может быть слово, число, определенная фраза, файл или отрывок текста. Применение одного ключа для обеих операций делает процесс простым. Выбор ключа зависит от способа шифрования, но общее правило в симметричном шифровании такое: чем длиннее ключ, тем сложнее его взломать. Использование одного ключа для обеих операций делает процесс простым;

• При асимметричном шифровании сообщение шифруется одним ключом, а расшифровывается другим. Причем первый ключ можно не скрывать, второй же нужно прятать. Такой подход убирает некоторые вопросы безопасности в сети. Часть ключей можно безопасно пересылать, и это не нарушит секретности.

Симметричные криптографические алгоритмы представляют собой два основных вида:

блочные шифры [3, с. 15], которые осуществляют обработку информации блоками, от чего и получили свое название. Длина каждого из них бывает разной, чаще всего 64 или 128 бит. Обработка базируется на применении к блоку ключа в установленном порядке, самыми применяемыми считаются перемешивание и подстановка несколькими циклами. В результате получается «лавинный эффект», которому свойственно терять биты между открытыми блоками и зашифрованными данными;

поточные шифры основываются на гаммировании (метод симметричного шифрования), для них характерно шифрование каждого бита, байта открытого текста. Поточные шифры часто создают, взяв за основу блочные, которые подвергаются запуску в определенном режиме.

Работает симметричное шифрование по следующему принципу:

1) берутся данные (которые нужно зашифровать) и ключ (сложные математические алгоритмы);

2) с помощью математический алгоритмов данные объединяются с ключом;

3) полученный массив данных передается по подготовленному каналу связи (закрытому или открытому);

4) переданный через канал связи массив чисел дешифруется ключом, на выходе получаются ранее зашифрованные данные.

В современном мире не обойтись без криптографических протоколов [4], защищающих конфиденциальные данные граждан. Шифрованию подлежат как каналы связи, так и передаваемая по ним информация. Выбор остается за используемыми алгоритмами шифрования, в зависимости от задачи будет применяться тот или иной алгоритм.

Библиографический список

1. Симметричное шифрование. URL: https://wiki.hostpro. ua/knowledgebase/shifrovanie-tipy-i-algoritmy/ (дата обращения: 15.10.2021).

2. Асимметричное шифрование. URL: https://encyclopedia. kaspersky.ru/glossary/asymmetric-encryption/ (дата обращения: 17.10.2021).

3. *Панасенко С. В.* Алгоритмы шифрования. М.: Юридический мир, 2015. 201 с.

4. Введение в криптографию: исследование. 2021. URL: https://habr.com/ru/company/yandex/blog/324866/ (дата обращения: 13.11.2021).

УДК 004.056.57+004.451. 9

И. А. Воропаев*
ассистент
М. В. Ляхнов*
студент
И. А. Жилин*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «TAILS»

Рассмотрена современная анонимная операционная система, сконструированная на Debian-системе. Проанализирован принцип работы операционной системы, основные инструменты, используемые для сокрытия информационных данных.
Ключевые слова: *анонимность, сохранность данных, конфиденциальность, защита информации, киберугроза.*

I. A. Voropaev*
Assistant
M. V. Lyakhnov*
Student
I. A. Zhilin*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

TECHNICAL CAPABILITIES OF OPERATING SYSTEM «TAILS» OVERVIEW

Considers a modern anonymous operating system designed on a Debian system. The principle of operation of the operating system, the main tools used to conceal information data are analyzed.
Keywords: *anonymity, data security, confidentiality, information protection, cyber threat.*

В современном мире анонимность – одно из важнейших условий пребывания в сети. Анонимность делает пребывание в Интернет-пространстве более безопасным, так как посещая различные сайты, заходя в социальные сети, есть риск оставить персональные данные, начиная от email-адреса, заканчивая данными банковской карты/электронного счета, которые могут попасть в руки мошенников с целью похищения денежных средств. Все это можно получить с помощью IP-адреса.

С проблемой анонимности в сети неплохо справляется операционная система (ОС) «TAILS» [1]. Само слово «TAILS» является аббревиатурой (The Amnesic Incognito Live System). Слово «Amnesic» означает, что «TAILS» всегда начинает работать «с нуля», все следы работы в нем исчезают. Словосочетание «live system» обозначает такую операционную систему, которая может быть запущена без установки (хранится на USB-носителе/DVD), не влияя на содержание жесткого диска (запоминающего устройства), то есть происходит работа с оперативной памятью компьютера, не оставляя при этом следов на той машине, которая использовалась. Данная система является дистрибутивом GNU/Linux на основе Debian, которая была разработана специально для решения данной проблемы, то есть обеспечить приватность и анонимность.

Эта операционная система была выпущена 23 июня 2009 года, основную финансовую поддержку получила от организации The Tor Project. Большая популярность и подтверждение того, что ОС – анонимная, пришли тогда, когда ее возможностями воспользовался Эдвард Сноуден для разоблачения PRISM.

Перейдем к техническим возможностям. Рассматриваемые программы в случае своего перечисления и объяснения в одном разделе в остальных упоминаться не будут.

Раздел «Favorites» («Избранное») содержит следующие программы:

1. «Tor Browser» используется для работы в сети в данной ОС используется Tor-браузер, шиф-

рующий соединения, передавая его через группу ретрансляторов. В данном случае стоит выбор: использовать автоматическое подключение в том случае, если многие люди используют Tor в том регионе, откуда идет подключение, также поступает предложение настроить мост, то есть использовать узел браузера, которого нет в открытом списке узлов. Либо можно подключиться в локальной сети, то есть к той компьютерной сети, которая покрывает относительно небольшую территорию [2]. Также Tor-браузер защищен модулем uBlock для блокировки рекламы.

2. «Tor Connection» – соединения с Tor-браузером.

3. «Configure persistent volume» – несмотря на то, что в «TAILS» все следы работы исчезают, можно создать на USB-носителе зашифрованное постоянное хранилище (persistence), в котором возможно сохранить файлы и настройки. Удобства такого хранилища состоит в том, что помимо сохранения есть возможность выбора – запускать данное хранилище или нет. При его запуске программа (которая ранее была сохранена) заново устанавливается при каждой загрузке, в отсутствии запуска остается новая ОС. Из недостатков можно выделить то, что данное хранилище зашифровано, но не скрыто, то есть всегда можно узнать, есть ли хранилище, если злоумышленник завладеет USB-носителем.

4. «Tails documentation» – программа, содержащая основную информацию по использованию ОС «TAILS».

5. «Tails Installer» утилита для установки операционной системы на виртуальную машину.

6. «Почтовый клиент Thunderbird» – для обмена и сообщениями используется клиент, который блокирует загрузку внешних изображений, также при нажатии на ссылку из письма появляется предупреждение, если сайт ведет сайт, отличный от сайта, указанного в URL-адресе (Uniform Resource Locator – адрес ресурса в сети Интернет). Thunderbird имеет расширение «Enigmail».

7. «KeePassXC» – кроссплатформенный менеджер паролей, позволяющий хранить все пароли в одном месте, для этого нужно запомнить лишь мастер-пароль, который предоставляет доступ к зашифрованной базе данных с паролями.

8. «Клиент обмена мгновенными сообщениями pidgin» – модульный клиент, основанный на библиотеке «libpurple», позволяющий сохранять комментарии к пользователям из контакт-листа, имеет возможность объединить несколько контактов в один метаконтакт.

9. «Файлы» – программа, отображающая все файлы, сохраненные в данной сессии.

В разделе «Internet» содержатся следующие компоненты:

1) «Electrum Bitcoin Wallet» – программный интерфейс для осуществления операций с Bitcoin (криптокошелек). Относится к легким/тонким кошелькам, то есть не требует ожидания для загрузки блокчейна;

2) «Onion Circuits» («Луковые цепи») – программа отображает информацию о текущих цепях Tor-соединения;

3) «OnionShare» – программа для обмена файлами через сеть Tor. Обмен происходит через сформированную ссылку, причем обмениваться можно как файлами, так и паролями, есть возможность ограничить количество скачиваний;

4) «Unsafe browser» – браузер, не являющийся анонимным, применяется, когда не может использоваться Tor-браузер (в случае нестабильного Интернет-соединения);

В разделе «System Tools» («Системные») находятся следующие программные возможности.

1) «Synaptic Package Manager» («Менеджер пакетов Synaptic») – графический интерфейс для системы управления пакетами «apt». Функции данного графического интерфейса:

- установка и удаление пакетов;
- обновление как отдельных пакетов, так и всей системы (dist-upgrade);
- поиск пакетов;
- ведение списка репозиториев, которые используются;

2) «Settings» («Параметры») – параметры в Tails позволяют выбрать регион и язык, настроить конфиденциальность, уведомление от приложений, выбор фона рабочего стола, подключение к сети (имеется защищенный proxy), подключение девайсов (мышь, клавиатура, принтеры и т. д.);

3) «Root Terminal» («Терминал с правами администратора») – из-за наличия root-прав пользователь может использовать функционал системы обширнее и выполнять необходимые ему действия в корневом каталоге;

4) «Terminal» (консоль для быстрого управления системой) – «окно коммуникации» между человеком и системой, с помощью которого можно осуществлять манипуляции с файлами в файловой системе. Так как «TAILS» [3] является дистрибутивом Linux, то возможна работа с терминалом, в котором можно прописывать командные строки (достаточно много утилит имеют только интерфейс командной строки, то есть некоторые задачи невозможно выполнить, не вводя команды). Внутри него можно запускать другие программы и настраивать их на взаимодействие друг с другом, также через него можно

работать с серверами для того, чтобы анализировать данные.

Раздел «Tails» предоставляет следующие возможности.

1) «About TAILS» – программа, представляющая окно, содержащее полное название и версию данной системы, есть возможность перехода на веб-страницу (tails. boum. org), на которой содержатся разделы с документацией, новостями, поддержкой и т. д.;

2) «Additional software» («Дополнительное программное обеспечение») – функция постоянного хранилища, позволяющая проводить автоматическую установку дополнительных программ при запуске TAILS;

3) «Delete persistent volume» – программа предоставляет доступ к удалению постоянного хранилища, после данного удаления можно создать новое хранилище без необходимости переустановки TAILS, но такой метод удаления данных не является надежным, поскольку злоумышленник, имея практические навыки, может восстановить старые данные, содержащиеся в хранилище;

4) «TAILS documentation» – программа, осуществляющая переход на веб-страницу (tails. boum. org), с целью ознакомления с общей информацией, возможностями скачивания, начало работы с TAILS и т. д.;

5) «Tails installer» – установщик TAILS, который осуществляет установку TAILS из TAILS. С помощью этой программы можно создать клон текущей TAILS или использовать загруженный образ «. ISO».

Раздел «Universal Access» («Специальные возможности») содержит программу «Dasher» – приложение для предиктивного набора текста, то есть предлагает варианты окончания слов/фраз. Согласно своему словарю может использовать тачпад, мобильное устройство, сенсорный экран.

Приложение в действии: курсор бегает по полям/фигурам (предлагаемым буквам), сверху расположено поле для отображения набранного текста, в случае неверно выбранной буквы требуется переместить курсор в левую часть окна, чтобы «не пересекать границы» неверно выбранной буквы.

В разделе «Utilities» («Утилиты») находится:

«Unlock VeraCrypt Volume» – VeraCrypt – утилита для шифрования диска, позволяет обмениваться зашифрованными файлами в разных операционных системах;

1) «Диски» – содержит информацию о диске/виртуальной машине, на которой установлен TAILS;

2) «Менеджер Архивов» – утилита для работы с архивами;

3) «Пароли и ключи» – утилита, позволяющая создавать ключи шифрования («Ключ PGP» используется для шифрования почты и файлов, «Ключ SSH» используется для доступа к другим компьютерам, «Связка ключей для паролей» – для хранения паролей приложений и сетевых узлов, «Секретный ключ» – для запроса сертификата, «Сохраненный пароль» безопасно хранит пароль или секрет);

4) «Просмотр документов» – утилита, позволяющая просматривать документы и работать с ними;

5) «Просмотр изображений» – утилита, позволяющая просматривать изображения и работать с ними;

6) «Системный монитор» – утилита, которая содержит информацию о процессах, ресурсах, файловой системе;

7) «Снимок экрана»;

8) «Справка» – содержит введение в функциональные возможности рабочего стола, способы завершения работы с учетной записью: завершение сеанса, переключение пользователей и др., а также запуск приложений из режима обзора.

«Tails» – это многоцелевая операционная система, разработанная специально для полной защиты своих данных. Устраняя хлопоты, связанные с установкой и настройкой пакетов программного обеспечения, «Tails» предлагает множество предустановленных инструментов для сокрытия своих персональных данных, передаваемой информации, публичных ключей. Такая система поможет скрыть свои персональные и конфиденциальные данные.

Библиографический список

1. Руководство по Tails. 2020. URL: https://hackware.ru/?p=7920 (дата обращения: 01.12.2021).

2. Защита от деанонимизации. 2020. URL: https://book. cyberyozh.com/ru/chto-takoe-whonix-i-s-chem-ego-edyat/ (дата обращения: 01.12.2021).

3. Tails – Анонимная операционная система. URL: https://spy-soft. net/tails-anonimnaya-operacionnaya-sistema-shpiona-edvarda-snoudena/ (дата обращения: 19.12.2021).

УДК 004.056.53+004.056.57

И. А. Воропаев*
ассистент
М. В. Ляхнов*
студент
Т. В. Косинский*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

НАВЫКИ OSINT В КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ

Проанализирован современный метод поиска информации. Цель исследования данного метода заключается в анализе навыков по поиску информации из открытых источников. Актуальность метода – своевременная реакция на новые опасности, как компьютерный вирус.
Ключевые слова: *информация, OSINT, личные данные, кибербезопасность, навыки.*

I. A. Voropaev*
Assistant
M. V. Lyakhnov*
Student
T. V. Kosinsky*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

OSINT SKILLS IN CYBERSECURITY

Analyzed the modern method of information retrieval. The purpose of the study of this method is to analyze the skills of finding information from open sources. The relevance of this method is a timely response to new dangers, like a computer virus.
Keywords: *information, OSINT, personal data, cybersecurity, counteraction, skills.*

С каждым годом растет количество информационных технологий, что непосредственно и увеличивает рост технических средств. В свою очередь он ведет к появлению новых информационных массивов. В современном мире люди перестали являться лишь пользователя, они стали частью информационного пространства. По оценке компании Seagate мировой запас данных лишь с 2018 по 2025 год будет иметь более, чем пятикратное увеличение. Причем половина данных будет в облачных хранилищах в открытом доступе.

Нужно понимать, что в электронной среде после каждого человека остаются следы. Следствием этого стала переориентировка поисковых мероприятий в Интернет. Социальные сети, сайты и различные форму стали основными источниками данных о человеке. Для такого понятия, как: «разведка информации из открытых источников», дали наименование OSINT [1]. Эта аббревиатура имеет несколько частей:

первая – «разведка». Этот метод поиска информации про человека стал одним из составляющих частей работы среди правоохранительных органов. Может использоваться во многих сферах структуры;

вторая составляющая – «открытые источники». Позволяет использовать доступную информацию из открытых источников, не нарушая при этом прав человека. Это особенно важно для различных коммерческих компаний, так как позволяет ориентироваться на клиента для дальнейшей сбыта товара или услуги. Все это безусловно влияет на экономическую составляющая, тем самым увеличивая капитал компаний. Следствием же этого стало увеличение специализированных кадров, использующих возможности OSINT.

Для многих пользователей сети «Интернет» поиск информации ассоциируется с простым web-серфингом, но OSINT является более глубокой методикой поиска информации [2]. Конкурентная разведка имеет два метода сбора информации – активный и пассивный. Под пассивным понимается простой просмотр Интернет-ресурсов по выбранными критериями. Но даже он имеет более глубокий анализ, нежели просто

просмотр. Для пассивного метода характерно использование служебной или технической информации: дата, время, место размещения, обнаружение файлов, дата и время создания аккаунта и т. д. Изучение дополнительной информации возможно также при помощи различных инструментов как встроенных, так и внешними программами. Активный метод – это активное воздействие на Интернет-ресурсы по средствам специальных инструментов или техники, также используются и методы социальной инженерии.

В современном мире существует множество видов специальных приложений, направленных на плохо подготовленного к разведке пользователя [3]. Первый вид такого приложения – многофункциональные пакеты. Их особенность заключается в том, что они направлены на активные действия киберразведчика и требуют особых знаний в сфере информационных технологий. Принцип поиска информации можно представить следующим образом:

- определение объекта поиска;
- процедура поиска;
- анализ полученных сведений;
- обобщение.

Разбирая более подробно можно понять, что определение, поиск и анализ могут применяться циклично, так как бывает и недостаток первоначальной информации о субъекте исследования. Зачастую интересующий объект исследования находится по средствам обнаружения похожих свойств или общих элементов другого субъекта. Из такого принципа формируется цепочка, которую можно подвергаться действиям трех принципов. Повторяя из раза в раз данные принципы, можно добиться результата, при котором данные одного цикла становятся входными данными следующего. На этом этапе какой-либо субъект позволяет скорректировать поиск в цепочке. Если же была собрана вся необходимая информация о субъекте после трех позиций, то происходит переход к четвертой позиции – обобщению. Второй вариант названия – «составление отсчета».

В некоторых источниках можно найти информацию об алгоритмах поиска, которые состоят из нескольких этапов [4]. Процесс в этих алгоритмах состоит из нескольких многоуровневых задач. В них обязательно присутствует разбивка алгоритма на несколько шагов, таких как:

- анализ собранной информации;
- понимание того, какие элементы пропущены;
- определение последующей цели;
- подбор необходимых инструментов;
- использование ранее подобранных инструментов.

Один из главных элементов безопасного поиска в системе – анонимность. Анонимное подключение устройства к сети Интернет, использование посредством таких базовых инструментов, как Tor и VPN. Этот аспект непосредственно важен и для сотрудников правоохранительных органов или же простых граждан, но в меньшей степени. Даже при пассивном методе сбора информации остаются следы о пользователе, что позволяет оппоненту отследить ваши шаги.

Для примера можно привести факт, что социальные сети хранят данные посещения учетных записей и делают на этом акцент. Если же при поисковых мероприятиях будут использоваться личные данные учетных записей, то это может стать вызвать обратный интерес, что непосредственно подставит под угрозу безопасность как сотрудника, так и его членов семьи. Анонимность является гарантом безопасности, так как позволяет скрыть факт поисковых мероприятий против правонарушителя или интересующего лица. Для улучшения анонимности также можно использовать учетные записи с ненастоящими данными, что позволяет увеличить количество поисковых мероприятий.

Из выше сказанного понятно, что система методов и навыков OSINT является необходимыми знаниями в XXI веке. Понимание и изучение информации по разведке из открытых источников может не только сохранить личные данные, но и спасти, к примеру, финансы. Для правоохранительных органов система поисковых мероприятий стала проще с введением нового метода поиска информации, что безусловно повлияло на улучшение качества работы и скорость принятия решений.

Библиографический список

1. Что такое OSINT? Основные инструменты и методы. URL: https://spspa.ru/chto-takoe-OSINT-osnovnye-instrumenty-i-metody/ (дата обращения: 14.09.2021).

2. Разведка на основе открытых источников. URL: https://habr.com/ru/post/534520/ (дата обращения: 16.09.2021).

3. Исследование на основе открытых источников или OSINT: где используется и в чем опасность. URL: https://eset. ua/ru/blog/view/117/issledovaniye-na-osnove-otkrytykh-istochnikov-ili-OSINT-gde-ispolzuyetsya-i-v-chem-opasnost (дата обращения: 16.09.2021).

4. Поисковые методы OSINT. URL: https://www.drweb.ru/pravda/issue/?number=1201 (дата обращения: 17.09.2021).

УДК 004.056.53+004.056.57

И. А. Воропаев*
ассистент
М. В. Ляхнов*
студент
М. Д. Сверлов*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «CSI LINUX»

Проанализирован дистрибутив для расследования киберпреступлений. Обсуждаются инструменты расследования, технические характеристики системы и ее принцип работы.
Ключевые слова: *форензика, информация, данные, киберпреступление.*

I. A. Voropaev*
Assistant
M. V. Lyakhnov*
Student
M. D. Sverlov*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

TECHNICAL CAPABILITIES OF OPERATING SYSTEM «CSI LINUX» OVERVIEW

The article considers a distribution focused on the investigation of cybercrimes. The main tools of the investigation, the technical characteristics of the system and its principle of operation.
Keywords: *forensic, Open Source Intelligence, information, data, cybercrime.*

В наш век информационных технологий постепенно меняются методы по предотвращению преступлений для правоохранительных органов. Некоторые традиционные преступления, особенно связанные с финансами и коммерцией, продолжают технологически развиваться. Это влечет за собой трудности в поиске и в вычислении преступников. Бумажные следы превратились в электронные следы и отпечатки. Преступления, связанные с кражей и с подделкой информации, выявляются ежедневно, однако нельзя сказать, что они выявлены все и что количество злоумышленников уменьшается. Серьезный и дорогостоящий террористический акт может исходить из Интернета. Преступникам не обязательно встречаться, чтобы передать какую-либо информацию. Ее надежнее зашифровать, например, в непримечательном видео. Дневник серийного убийцы может быть записан на жестком диске, а не на бумаге в записной книжке и т. д.

Для выявления таких преступлений существуют такие отрасли, как форензика и OSINT (Open source intelligence – процесс разведки по открытым источникам). Специалисты форензики, или же компьютерной криминалистики, интересуются не только содержанием электронных писем, которые посылал или получал злоумышленник, документов и других файлов, но и метаданными, связанными с этими файлами. Метаданные предоставляют дополнительную информацию об определенном наборе данных, которая может быть раскрыта сама по себе. Например, записи действий пользователя могут также храниться в файлах журналов и других приложениях на компьютере, таких как Интернет-браузеры. Вместо того чтобы делать выводы по делу, по которому ведется расследование, как во многих судебных дисциплинах, компьютерная криминалистика производит прямую информацию и данные, которые могут иметь значение в деле. Этот тип прямого сбора данных имеет широкие последствия как для отношений между следователем и судебным экспертом, так и для рабочего продукта судебно-компьютерной экспертизы. OSINT применяется для деанона любого человека с помощью сбора информации, находящейся в общедоступных источниках, та-

ких как Интернет (хотя поиск информации может не ограничиваться лишь им, поскольку разведка OSINT затрагивает все общедоступные источники).

Методы компьютерной криминалистики позволяют анализировать данные, оставшиеся в системе, и определять их использование, происхождение и место назначения благодаря метаданным, находящимся в них. Для этих методов нужны специальные инструменты, которые будут полезны в расследовании не только для нахождения нужных доказательств преступлений, но и для соблюдения законов, чтобы наши доказательства котировались в суде. Для таких целей был создан специализированный дистрибутив, которым активно пользуются следователи.

CSI Linux является дистрибутивом Linux, созданным для цифровой криминалистики. Он был создан членами правоохранительных органов, членами разведки и военными и по сей день продолжает развиваться благодаря им. Этот дистрибутив с открытым исходным кодом можно скачать с официального сайта и, возможно, привнести вклад в индустрию кибербезопасности. Он имеет множество различных возможностей для расследования, анализа и реагирования. CSI Linux доступен как в виде устройства виртуальной машины, так и в виде загрузочного дистрибутива для использования в качестве повседневного драйвера. Однако обычно в расследованиях целесообразно использовать его в виде виртуальной машины.

Существует два способа использования виртуального устройства для кибер-расследований. Самый распространенный из них – это использование одного экземпляра сразу для нескольких случаев. Система управления делами помогает нам расфасовать их по разным кейсам для удобства работы, а также делает MD5-хеш всех файлов в кейсе, сжимая в архивную папку, когда заканчивается работа с инструментами.

Второй способ – использование одного экземпляра CSI Linux для одного случая. Это популярный метод для правоохранительных органов и других организаций, которым необходимо обеспечить конфиденциальность, целостность и доступность доказательств. Когда заканчивается какое-либо дело, имеется возможность заархивировать этот экземпляр и сохранить его как контейнер для улик. Таким образом, среда используется только для одного случая. Нет возможности случайного перекрестного заражения, если вводится неверная информация. Когда дело закрыто, есть возможность переместить его в группу «Закрытые дела» внутри VirtualBox. Когда необходимо представить итоги расследования, можно создать OVA-файл CSI_Linux_CaseName виртуальную машину, скопировать ее в два различных места (резервное копирование) и удалить этот экземпляр CSI Linux из VirtualBox.

Дистрибутив CSI Linux был сделан на основе Ubuntu, ориентированный на исследования кибербезопасности, начиная с OSINT и заканчивая форензикой [1], компьютерной криминалистикой, сетевым анализом, обратным проектированием и т. д. Дистрибутив Linux – для цифровой криминалистики, который включает в себя стандартные шаблоны документов судебной экспертизы и виртуальную тонну ресурсов. По вопросу использованного окружения рабочего стола вместо Gnome CSI Linux использует Xfce, что является разумным решением, так как его внешний вид отвечает основным требованиям – быть простым и легким в настройке. Это делает его менее требовательным. Использование данного окружения имеет и свои минусы, например, собственный его диспетчер файлов и папок thunar, у которого скупой функционал. Это значительно может снизить производительность работы.

Компания CSI Linux создала довольно много инструментов для упрощения цифровых расследований, включая несколько графических интерфейсов для многих инструментов командной строки, которые входят в систему управления делами. Это означает, что доказательства, которые можно собрать с помощью этих инструментов, будут автоматически добавлены к делу, над которым ведется работа, хешированы и заархивированы, как только будет закрыта система управления делами. Это обстоятельство помогает подтвердить и сохранить доказательства во время сбора.

Большое внимание уделяется расследованиям OSINT и Dark Web с использованием как сторонних, так и настраиваемых инструментов, помогающих в сборе и отчетности. Как только появятся доказательства в отношении какого-либо лица, совершившего преступление, то это означает, что пора заняться расследованием и отправиться туда, куда они приведут.

Несмотря на то, что этот дистрибутив Linux, имеет часто используемые злоумышленниками инструменты, CSI Linux не является дистрибутивом для атак, как «Kali Linux» [2], которая безосновательно игнорируется в большинстве сфер деятельности специалистов в сфере расследования киберпреступлений. (Хотя большинство основных элементов преимущественно изучаются на примере данного дистрибутива, или «Parrot Security», которую рекомендуют абсо-

лютно все специалисты информационной безопасности, но содержит в себе многие из тех же инструментов, что и эти дистрибутивы.) Цель состоит в том, чтобы не нарушать закон и поддерживать целостность расследования, чтобы доказательства могли быть поддержаны в суде.

Стоит проанализировать инструментарий, который присутствует в дистрибутиве. Он помогает в форензике и OSINT. Очень часто для расследования нужно атаковать нелегальный сайт, но перед атакой его нужно изучить, ведь одним из основных шагов при атаке на Интернет-приложение является перечисление скрытых каталогов и файлов. Это часто может дать ценную информацию, которая упрощает выполнение конкретной атаки, оставляя меньше места для ошибок и потраченного впустую времени. Для этого доступно множество инструментов, но не все они созданы одинаково [3]. Однако команда CSI Linux добавила такой инструмент, как Gobuster, – сканер записей, написанный на языке «Go». В популярных каталогах сканеры грубой силы, такие как DirBuster и DIRB, работают великолепно, но часто могут быть медленными и быстро реагировать на ошибки. Gobuster может быть реализацией этих инструментов в Go и доступен в удобном формате командной строки. Основное преимущество Gobuster перед другими сканерами каталогов – это скорость. Как язык программирования, Go считается быстрым. Он также отлично справляется с параллелизмом, так что Gobuster может извлечь выгоду из нескольких потоков для более быстрой обработки. Однако единственное поражение Gobuster – это отсутствие рекурсивного исследования каталогов. К сожалению, для каталогов, находящихся на достаточной глубине одного уровня, потребуется еще одно сканирование. Часто это не так важно, и другие сканеры могут усилить и заполнить пробелы для Gobuster [4] в этой области.

Почти каждое дело частного расследования включает в себя какое-либо онлайн-исследование. Процесс исследования обычно начинается с ввода поисковых запросов в одну из основных поисковых систем, например, в нашем дистрибутиве предустановлен Google Chrome. Затем просматривается список результатов поиска, начинается посещение различных веб-сайтов.

Потом следует просмотреть подробные данные и информацию на каждом сайте. Оперативно могут быть открыты десятки вкладок браузера и несколько десятков URL-адресов (Uniform Resource Locator – адрес ресурса в сети Интернет) в нашей истории просмотров. Попутно нужно останавливаться и делать скриншоты, сохранять изображения, документы, делать заметки, копировать и вставлять URL-адреса в текстовый файл или документ «Word» и т. д. Все это требует времени и может отвлечь от процесса исследования. В конечном итоге тратится половина или больше времени на документирование того, что обнаружили, и на оценку этой информации остается уже недостаточно времени.

Для упрощения данного процесса установили «Hunchly», которая была разработана для онлайн-расследований. Программное обеспечение предназначено в основном для использования правоохранительными органами, частными детективами, специалистами по исследованиям в области кибербезопасности и журналистами, ведущими расследования. Это утилита, которая при исследовании сайтов позволяет сохранять интересующие результаты. В ней можно сохранять фотографии, делать заметки, помечать некоторые файлы, а также она автоматически ведет лог посещения страниц. И еще поможет при вводе ключевых слов находить нужную нам информацию и помечать ее. Возможности Hunchly отлично могут раскрываться при проведении масштабных расследований, в которых нужно сохранять сотни гигабайт информации, чтобы потом можно было вернуться к ним для анализа, сделать пометки, сохранить фото, а потом еще и отфильтровать нужную информацию. У этой утилиты только одна проблема: она является платной. Но для получения бесплатного ключа на 30 дней нужна только электронная почта, что, вероятно, не будет проблемой. Но не стоит забывать об простом правиле: ни в коем случае не вводить свою настоящую электронную почту для расследований.

Стоит повторить, что OSINT расшифровывается как Open Source Intelligence и относится к данным, которые можно получить из общедоступных источников, таких как IP-адреса, доменные имена, веб-сайты, HTTP, DNS, FTP и другие источники, такие как социальные сети, форумы, страницы профилей, видео и т. д. OSINT – один из лучших способов получить информацию о любой цели, который используется многими частными исследователями, корпорациями и правительственными спецслужбами.

«Spiderfoot» – это инструмент, написанный Стивом Микаллефом, который автоматизирует весь процесс OSINT. Поскольку в Интернете доступно множество данных о различных сервисах, сетях и протоколах, сбор всей этой информации из каждого отдельного места по одному становится довольно трудоемкой задачей. Именно тогда на помощь приходит SpiderFoot, поскольку его можно использовать для автомати-

зации процесса сбора OSINT, чтобы найти что-либо о нашей цели, централизованно с помощью одного инструмента.

Чтобы автоматизировать OSINT, Spiderfoot [5] запрашивает более 100 общедоступных источников информации и обрабатывает все интеллектуальные данные из доменных имен, адресов электронной почты, IP-адресов, DNS-серверов и многого другого. Укажите цель, выберите модули для запуска, и Spiderfoot выполнит всю работу, собрав все данные для создания полного профиля всего, что исследуется. Инструменты OSINT, такие как Spiderfoot, особенно полезны для передачи информации о любой цели, выявления возможных утечек данных или обнаружения полных уязвимостей, имеющихся в их сети или приложениях. Эта информация может быть полезна при проведении тестирования на проникновение, аудита собственной сети или сторонней авторизованной сети.

Настройки каждого модуля имеют свои параметры, но без необходимости их лучше не менять. На модули рядом с названием стоит защита. Это может означать только то, что для полноценной работы модуля ему необходимы API-ключи, которые придется добывать вручную. Поэтому для того, чтобы можно было задействовать все возможности SpiderFoot, которые явно не будут лишними, придется добавить ключи.

После того как нажмем запуск, начнется долгое сканирование. Самый простой объект будет сканироваться длительное время. Однако при этом в результате SpiderFoot найдет очень много информации. В процессе сканирования в реальном времени будет строится диаграмма отчета. При нажатии на нужный столбец на диаграмме увидим отчет именно по этому пункту, в котором будет детально расписано, где и что было найдено, а также вся доступная информация по конкретному пункту.

CSI Linux – это многоцелевая операционная система, разработанная специально для кибер-расследователей. Устраняя хлопоты, связанные с установкой и настройкой пакетов программного обеспечения, CSI Linux предлагает множество предустановленных инструментов для онлайн-расследования, анализа вредоносных программ и предотвращения безопасности. В связи с неуклонным ростом киберпреступлений компании и госучреждения все больше вовлекаются в создание лабораторий кибер-расследований для борьбы с преступлениями, совершаемыми через Интернет. И данный дистрибутив идеально подходит для их расследования и доказательства имеют вес в суде по стандарту Доберта.

Библиографический список

1. What is Computer Forensics. 2020. URL: https://forensiccontrol.com/2020/11/26/what-is-computer-forensics/ (дата обращения: 10.12.2021).

2. *Michael G.* Recovering and Examining Computer Forensic Evidence. 2021. URL: https://archives. fbi.gov/ (дата обращения: 15.12.2021).

3. *Федотов Н. Н.* Форензика – компьютерная криминалистика. Юридический мир, 2007. 360 с.

4. Penetration Testing Tools in Kali Tools. 2021. URL: https://www.geeksforgeeks.org/gobuster (дата обращения: 17.12.2021).

5. Documentation // SpiderFoot. URL: https://www.spiderfoot. net/documentation/ (дата обращения: 21.12.2021).

УДК 004.056.57+004.451. 9

И. А. Воропаев*
ассистент
М. В. Ляхнов*
студент
А. В. Шушкин*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «CAINE»

В данной статье рассмотрены основные возможности операционной системы, ориентированной на расследование киберпреступлений, приведен перечень предустановленных программных приложений и основных инструментов, разобран принцип работы дистрибутива.
Ключевые слова: *форензика, киберрасследование, информация, данные, киберпреступление.*

I. A. Voropaev*
Assistant
M. V. Lyakhnov*
Student
A. V. Shushkin*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

OVERVIEW OF OPERATING SYSTEM «CAINE» TECHNICAL CAPABILITIES

This article reviews the main features of an operating system focused on investigating cybercrimes, provides a list of preinstalled software applications and basic tools, and discusses the principle of operation of distributions
Keywords: *forensics, cyber investigation, information, data, cyber crime.*

В современном мире компьютер предоставляет огромный доступ к любой информации, которая находится в сети Интернет. Люди стали «доверять» Интернету все. Утренние новости или счет в банке, просмотр видеороликов или образование – почти вся личная жизнь по каждому человеку есть в глобальной сети. Поэтому часто бывает, что людей обманывают, запускают вирусы, ловят на фишинге, крадут важную информацию с компьютера или счета с помощью информации о банковских картах. Чтобы находить подобных злоумышленников, существуют люди, которые занимаются такой наукой, как форензика. Форензика – наука, связанная с раскрытием киберпреступлений: поиском доказательств, получения и закрепления их. Криминалистика в сфере IT (information technology, информационных технологий) и компьютерной безопасности основана на анализе функциональности программных приложений и служб.

«CAINE» – итальянский дистрибутив на базе GNU/LINUX, основанный на системе Ubuntu. Он создавался специально для решения проблем, связанных с наукой «forensic», в качестве проекта по реализации цифровой экспертизы [1]. «CAINE» предлагает готовую open-source (продукт с открытым исходным кодом) среду, в которую интегрировано большинство существующих инструментов программного обеспечения, необходимых для проведения экспертизы. Он способен анализировать информацию, которая осталась после взлома системы. Этот дистрибутив специально разработан, чтобы помогать и направлять специалистов во всех видах профессиональной судебной экспертизы [2]. Содержит множество программных приложений для поиска, сбора, разведки, судебной экспертизы. Рассмотрим некоторые из них.

1. PhotoRec – это программное обеспечение для восстановления файлов записей с камер,

утраченных данных и потерянных кадров. Он игнорирует файловую систему и работает с данными напрямую, даже если файловая система сильно повреждена или отформатирована. Использование данного дистрибутива позволяет также производить требуемые операции с ячейками памяти напрямую вне зависимости от действий, произведенных предыдущими пользователями, что активно используется при расследовании киберпреступлений.

2. Bulk Extractor – это инструмент, который может просканировать файлы или образы дисков и найти на них полезную информацию. Например: номера телефонов, счета банковских карт, доменные имена. Также полезен для взлома паролей или нахождения вредоносного ПО. У него есть графический интерфейс, который оптимизируется с множеством языков, в том числе и python. В программе реализована многопоточность, что позволяет производить вычисления на системах с несколькими ядрами процессора быстрее аналогов.

3. Tinfoleak – это инструмент с открытым исходным кодом, который автоматизирует извлечение информации из Twitter и облегчает ее последующий анализ для получения информации. Принимая в качестве входных данных идентификатор пользователя, географические координаты или ключевые слова, программа анализирует временную шкалу Twitter, чтобы извлечь большие объемы данных и показать полезную и структурированную информацию для аналитика разведки.

4. Dumpzilla – это инструмент, который написан на языке python3. Используется для нахождения нужной информации из веб-браузера. К сожалению, он поддерживает только один браузер – Mozilla Firefox. Может показывать историю поиска других людей, веб-формы, сохраненные пароли и файлы cookie [3, с.75].

5. Wireshark – это программа, которая анализирует сетевые протоколы. Она видит все, что происходит в сети, отображает информацию по всем действия пользователя в Интернете. Используется для перехвата пакетов, транспортирующихся по сети. При отсутствии шифрования Wireshark позволяет получать данные, направляемые пользователями по сети.

6. Fsstat – отображает подробную информацию, связанную с файловой системой. Вывод этой команды зависит от файловой системы. Дан как минимум диапазон значений метаданных (номеров inode) и единиц содержимого (блоков или кластеров). Также приведены подробные сведения о суперблоке, такие как время монтирования и особенности. Для файловых систем, использующих группы (FFS и EXT2FS), отображается структура каждой группы.

7. Sleuth Kit – это набор инструментов командной строки и библиотека C, которая позволяет анализировать образы дисков и восстанавливать из них файлы. Он используется негласно в Autopsy и многих других коммерческих и криминалистических инструментах с открытым исходным кодом.

8. Autopsy – это простая в использовании программа с графическим интерфейсом пользователя, которая позволяет эффективно анализировать жесткие диски и смартфоны. Чаще всего используется для составления отчетов о криминалистических операциях. Он имеет подключаемую архитектуру, которая позволяет вам находить дополнительные модули или разрабатывать собственные модули на Java или Python.

9. Fiwalk – программа, основанная на Ubuntu и оснащенная единым графическим интерфейсом на базе оболочки MATE для управления набором разноплановых утилит по исследованию Unix- и Windows-подобных систем. Основная функция программы заключается в обработке жесткого диска и выводе результата исследования диска в формате XML. Может быть использован для проведения криминалистического анализа с целью выявления остаточной информации для восстановления картины взлома системы. Также используется при работе с жесткими дисками после уничтожения информации вредоносным программным кодом для поиска скрытых и удаленных данных на дисках.

10. NBTempo – это сценарий Bash с графическим интерфейсом, который генерирует временные шкалы. Следователь выбирает файл изображения или диск. Затем после указания целевого каталога, часового пояса, временной задержки данных в системе жертвы и исследуемого периода времени, NBTempo быстро выдаст результаты.

11. RegRipper – инструмент для анализа реестра. Программа написана на Perl и является одним из самых быстрых инструментов для анализа.

12. HDSentinel – это ПО для того, чтобы тестировать и устранять неполадки в жестких дисках. Оно дает полное описание, информацию и характеристику всех жестких дисков. Используется для защиты данных на диске. Предотвращает сбои и потери данных этого диска, с помощью одной из самых чувствительных систем оценки состояния жесткого диска [4, с.178].

Библиографический список

1. Руководство по Caine. URL: https://hackware.ru/?p=7920 (дата обращения: 01.11.2021).

2. *Love R.* Ядро Linux: описание процесса разработки. 3-е изд. М.: Вильямс, 2013. 496 с.

3. Руководящие указания по конструированию прикладного программного обеспечения для операционной системы общего назначения «Astra Linux Common Edition». Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение Русские Базовые Информационные Технологии». М., 2011. 77 с. URL: https://astralinux.ru/assets/docs/RUK-OSON-DEV_2-12.pdf (дата обращения: 01.11.2021).

4. *Нейманзаде М. И., Королёв С. Д.* Руководство по эффективному программированию на Linux. АО «МЦСТ», 2020. 178 с. URL: http://www.mcst.ru/files/5ed39a/dd0cd8/50506b/ 000000/elbrus_prog_2020-05-30.pdf (дата обращения: 01.11.2021).

УДК 004.7 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-33-37**

А. Д. Данилов*
доктор технических наук, профессор
Д. С. Синюков*
аспирант
**Воронежский государственный технический университет*

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЯДЕРНЫМ БЛОКОМ

В статье приведены результаты обязательной модернизации информационно-вычислительной системы (ИВС) управления, выполненной при продлении срока действия 4 энергоблока Нововоронежской АЭС. Проблема была решена на основе принципа унификации. Программное обеспечение всех компонентов программно-технического комплекса ИВС, включая функции систем предоставления параметров безопасности и внутриреакторного контроля, реализовано на единых программных средствах.
Ключевые слова: *информационно-вычислительная система, клиент-серверная архитектура, контроль параметров, устройство сопряжения с объектом, архив данных.*

A. D. Danilov*
Dr. Sc. Tech., Professor
D. S. Sinyukov*
PhD Student
**Voronezh State Technical University*

DISTRIBUTED INFORMATION AND COMPUTING SYSTEM FOR CONTROLLING THE NUCLEAR UNIT

The article presents the results of the mandatory modernization of the information and computing control system (ICCS), performed during the extension of the validity period of 4 power units of the Novovoronezh NPP. The problem was solved on the basis of the principle of unification. The software of all components of the IVS software and hardware complex, including the functions of systems for providing security parameters and in-reactor control, is implemented on unified software tools.
Keywords: *information and computing system, client-server architecture, parameter control, interface device with an object, data archive.*

Введение

Ядерные блоки атомных электростанций имеют длительный срок эксплуатации, что приводит к ситуации, когда в процессе эксплуатации технические и программные средства систем управления перестают отвечать текущим современным требованиям в плане надежности и безопасности их использования. В результате для продления срока действия ядерного блока требуется обязательное проведение модернизации информационно-вычислительной системы (ИВС) управления.

В данной статье приводятся результаты такой работы, проведенной на 4 блоке Нововоронежской АЭС.

Принципы построения внедряемой ИВС

При выборе оборудования для создания новой ИВС модернизируемого энергоблока был реализован принцип унификации [1], [2]. Программное обеспечение всех компонентов программно-технического комплекса (ПТК) ИВС, включая функции системы предоставления безопасности (СППБ) и системы внутриреакторного контроля (СВРК), реализовано на единых программных средствах. Представление значений параметров сигналов на всех рабочих станциях ПТК ИВС, интерфейсы взаимодействия, человеко-машинный интерфейс и навигация по видеокадрам идентичны, что учитывает требования по оптимальному взаимодействию системы «человек-машина». На рис. 1 представлена принципиальная схема построения ИВС на энергоблоке № 4 после модернизации.

Система удовлетворяет требованиям по обеспечению надежности на основе резервирования, независимости, разнообразия с учетом отказов по общей причине.

Для этого ИВС была реализована в виде двухканальной информационной системы [3], [4]. Основной и дублирующий каналы измерения и об-

работки данных в ПТК ИВС функционируют одновременно в полном объеме. В серверах оперативного контура вычислительного комплекса ИВС, к которым относятся два сервера ИВС и два сервера СВРК, информация, полученная от двух каналов устройств связи с объектами УСО ИВС и УСО СВРК, обрабатывается совместно, что обеспечивает отсутствие влияния отказа в одном из каналов УСО на результаты работы ИВС.

Функционал разработанной ИВС

Оборудование разработанной ИВС при режимах нормальной эксплуатации и нарушениях нормальной эксплуатации модернизируемого блока реализует следующий *информационный функционал* [5], [6]:

– прием информации от всех существующих, модернизированных и вновь созданных подсистем систем контроля и управления (СКУ) энергоблока (ЭБ) в соответствии со структурной схемой ИВС;

– представление актуальной и ретроспективной информации оперативному персоналу, а также экспертам аварийных центров АЭС и Концерна Росэнергоатом;

– компенсация запаздывания сигналов ДПЗ;

– учет влияния неполного перемешивания теплоносителя в головках кассет на показания термопреобразователя (ТП) на выходах кассет;

– контроль температуры (или энтальпии) теплоносителя на выходе из горячего канала.

Дополнительно к последней функции реализованы следующие опции:

1) компенсация запаздывания сигналов ДПЗ;

2) учет влияния неполного перемешивания теплоносителя в головках кассет на показания ТП на выходах кассет;

3) контроль температуры теплоносителя на выходе из горячего канала.

Функционал СППБ включает:

– своевременное уведомление оператора о нарушении критических функций безопасности (КФБ), отображение сигнализации об изменениях состояния КФБ;

– представление оперативному персоналу электронного аналога деревьев состояния КФБ, определяющих выбор процедуры по восстановлению КФБ;

– выдача оператору рекомендаций о применении той или иной процедуры по восстановлению КФБ (контроль состояния диагностических блоков (узлов) деревьев КФБ и контроль активации выходных ветвей деревьев КФБ);

– предоставление электронных интерактивных процедур восстановления КФБ;

– предоставление справочной или расчетной информации, необходимой для принятия решений и выполнения управляющих действий, определенных в определенных в «Руководстве по управлению за проектными авариями»;

– предоставление необходимой информации о состоянии рабочих механизмов, используемых при выполнении управляющих действий.

Автоматизированные рабочие места оперативного персонала

Автоматизированные рабочие места (АРМ) оперативного персонала обеспечивают представления всей совокупной технологической информации оперативному персоналу блока и сигнализацию о нарушениях технологического процесса. АРМ получают информацию от каждого сервера ИВС, работают независимо друг от друга и представляют информацию на мониторах в цикле приема данных от серверов.

В состав ИВС входят следующие *автоматизированные рабочие места оперативного персонала*:

– АРМ ведущего инженера управления реактором (ВИУР), состоящий из двух дисплеев, размещенных на панелях, и трех дисплеев, размещенных на столе БЩУ;

– АРМ ведущего инженера управления турбиной (ВИУТ), состоящий из двух дисплеев, размещенных на панелях, и одного дисплея, размещенного на столе БЩУ;

– АРМ начальника смены блока (НСБ), состоящий из одного дисплея, размещенного на столе БЩУ;

– АРМ РЩУ, состоящий из двух дисплеев, размещенных на РЩУ;

– АРМ начальника смены (НС) АЭС, состоящий из дисплея, размещенного на рабочем месте НС АЭС;

– АРМ системного администратора ИВС;

– АРМ системного инженера и АРМ дежурного инженера;

– УРМКФ (рабочее место контролирующего физика).

На мониторы оперативных АРМ выводятся следующие данные:

– технологическая информация (представление видеокадров, сигнализация, протоколирование технологических событий, вывод архивных данных);

– прогноз состояния РУ (с участием оперативного персонала).

На мониторы неоперативных АРМ выводится информация:

– диагностика состояния измерительных каналов;

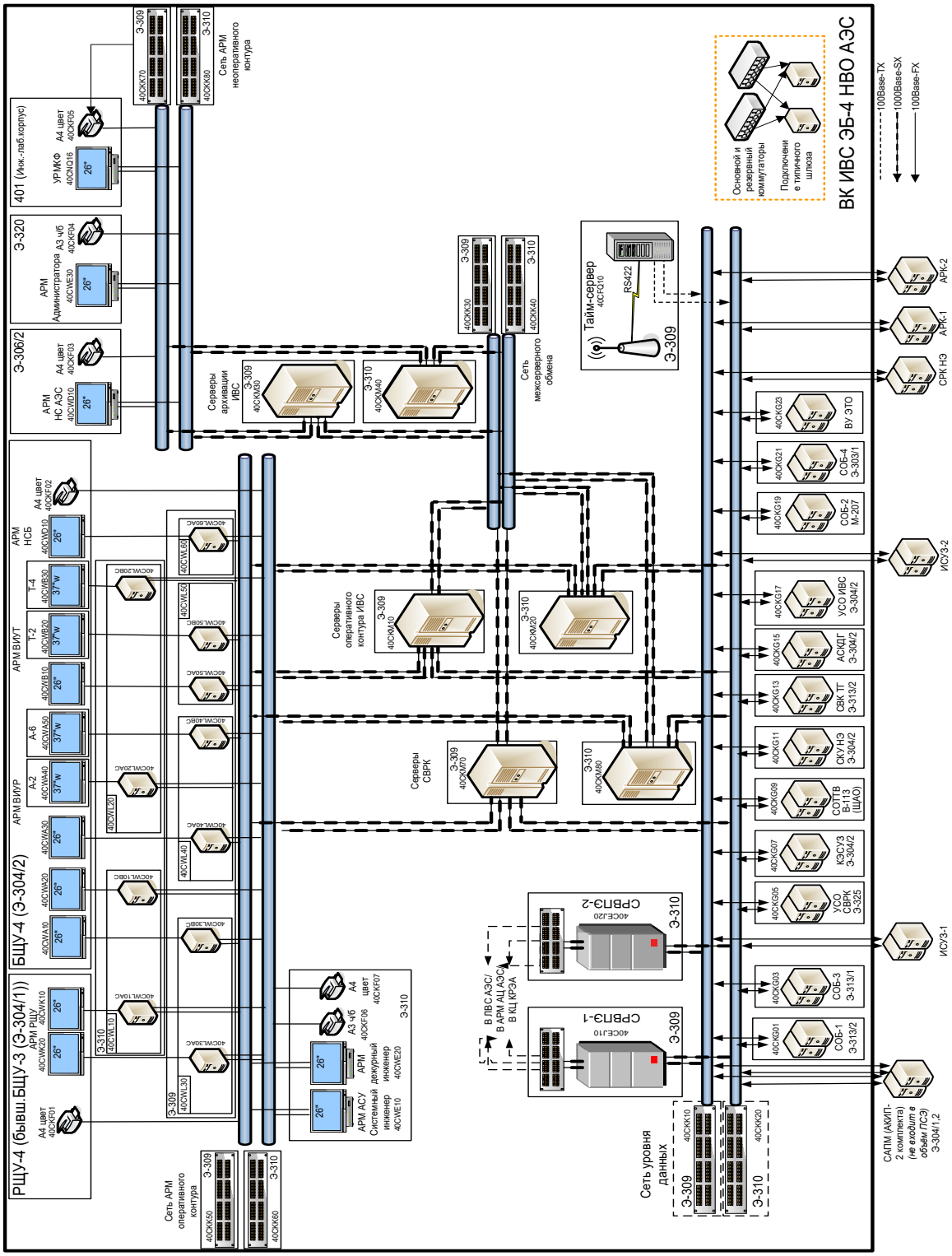


Рис. 1. Принципиальная схема информационно-вычислительной системы после модернизации энергоблока № 4: СОБ – система обеспечения безопасности; СКУ –система контроля и управления; СВК – система контроля вибрации; АСК – автоматизированная система контроля; КЭСУЗ – комплект электрооборудования систем управления защитой

– контроль и диагностика ПТК ИВС;

– контроль санкций доступа персонала.

Реализация решения использовать однотипные аппаратные и программные средства шлюзового оборудования, входящего в состав ИВС модернизированного энергоблока, позволяет оптимизировать состав резервного оборудования и избежать программных конфликтов при обмене данными «шлюз-сервер». Шлюзовое прокладное программное обеспечение энергоблока предусматривает до 40 протоколов обмена со смежными системами.

На сегодня на данном энергоблоке создана сетевая инфраструктура для подключения до 24 предусмотренных проектом ИВС систем.

Программное обеспечение разработанной ИВС

В качестве базовой платформы для разработанной ИВС был выбран программный комплекс «Круиз». ПО комплекса имеет модульную структуру и создается проектным путем (конфигурируется) на базе библиотеки программных средств «Круиз». Сконфигурированное ПО является децентрализованным и может функционировать как на одном компьютере, так и на многомашинном комплексе. По решаемым задачам и степени инвариантности к прикладным задачам ПО было реализовано четыре уровня [3], [7].

Уровень 1 – операционная система (не является частью ПО «Круиз»). Чаще всего на оборудовании оперативного персонала используется ОС Linux, на оборудовании неоперативного персонала – различные версии Windows.

Уровень 2 – средства абстрагирования от операционной системы. Они, как и уровни 3 и 4, входят в состав ПО «Круиз». Наличие этого уровня позволяет использовать ПО полуфабрикатного режима (ПФР) с разными операционными системами без изменений в прикладных программах: для перехода к другой операционной системе достаточно заменить библиотеку программных средств уровня 2 и перекомпилировать ПО уровней 3 и 4. Программные средства уровня 2 пользовательского интерфейса не имеют и обслуживания не требуют.

Уровень 3 – базовые сервисы. Уровень реализует механизмы взаимодействия между прикладными программами. Сервисы реализуют свои функции путем вызова программ из библиотеки функций ПО «Круиз». В состав ИС входят следующие *базовые сервисы*:

– *сервис запуска ПО* обеспечивает управление остальными включенными в конфигурацию системы сервисами;

– *сервис хранилища* обеспечивает функционирование размещенных на жестком диске каждой ЭВМ ИС файлов (Хранилища данных), содержащих информацию о конфигурации и настройках системы и необходимые для рестарта накапливаемые данные. Сервис выполняет в том числе синхронизацию Хранилищ разных ЭВМ;

– *сервис диспетчера* обеспечивает организацию взаимодействия и обмена данными между модулями диспетчера, выполняющими функции приема, обработки и передачи данных. Каждый модуль диспетчера может обмениваться данными с диспетчером через специализированный программный интерфейс. Диспетчер хранит перечни входных и выходных данных каждого включенного в конфигурацию модуля, по приходу от данных от любого модуля раздает заинтересованным в них модулям. Включение в конфигурацию нового модуля может выполняться как при остановленном, так и при работающем диспетчере;

– *сервис протокола сообщений* обеспечивает функционирование протокола событий;

– *сервис архива* обеспечивает функционирование аппертурного архива;

– *сервис самодиагностики* обеспечивает контроль состояния оборудования.

Уровень 4 – прикладные программы и модули, выполненные в виде программных библиотек. Программные средства данного уровня комплексно разработаны по единым требованиям, что исключает проблемы совместимости нижнего и верхнего уровней разработанной платформы.

Обеспечение надежности предлагаемых разработанных ИВС

Надежность реализованных на единой платформе решений обеспечивается следующим [1], [2]:

– оборудование изготовлено серийно по техническим условиям под контролем

надзорных органов;

– программные средства разработаны в соответствии изложенными в МЭК 60880 и 62138 требованиями процедуре разработки ПО систем, важных для безопасности;

– организация программной среды обеспечивает возможность резервирования оборудования;

– ряд важных для безопасности функций реализован в нескольких (не менее двух) вариантах в разных программных модулях, обеспечена возможность одновременной работы альтернативных алгоритмов и автоматического сравнения результатов;

– в системах с дублированной структурой для повышения надежности на основе разноо-

бразия реализована мультиплатформенность ПО, позволяющая на основном и резервном оборудовании использовать разные операционные системы;

– прием данных от измерительной аппаратуры и обработка данных выполняются в жестком цикле по принципу «все всегда», что обеспечивает отсутствие зависимости загруженности (работоспособности) системы от режимов работы контролируемого объекта.

В ИВС модернизированного энергоблока используется российская операционная система Astra Linux «Смоленск», сертифицированная в системах сертификации средств защиты информации ФСТЭК России. В роли основного программного обеспечения выступает аттестованное в «Ростехнадзор» программное обеспечение «Круиз» 3.3. Разработчиком программного обеспечения является ООО «ИФ СНИИП АТОМ», что дает возможность дальнейшего всестороннего развития этой программной платформы. Внедрение отечественных программных продуктов хорошо отражает общее направление развития во всех отраслях Российского производства после 2014 года.

Модульная структура построения с возможностью гибкого распределения функций между компьютерами позволяет распределять нагрузку и определять индивидуальные роли каждого сервера, шлюза и т. д. Клиент-серверная архитектура, используемая в классических решениях, ограничена вычислительными возможностями обработки данных в сервере.

Модульный подход позволяет иметь всего один дистрибутив программного обеспечения, а пакет настраиваемых «профилей» оборудования позволяет оперативно конфигурировать один «системный блок» под любые задачи – от шлюза до сервера. Эти свойства программного обеспечения дают возможность иметь универсальный резерв оборудования при ограниченном количестве ЗИП.

Заключение

В результате выполнения работ по модернизации 4 энергоблока АЭС был разработан уникальный программно-технический комплекс, построенный на модульном принципе и объединивший различные функции вычислительных систем энергоблока. Достигнуты цели по унификации представления данных оператору от различных систем энергоблока, унифицировано представление данных различным группам пользователей. Расширены возможности представления данных. Получены новые возможности информационной поддержки оператора, облегчающие оценку состояния оборудования и принятия решения по управлению блоком. Повышена надежность и устойчивость работы оборудования за счет применения принципов дублирования, резервирования и разнообразия. Унифицированы технические средства программно-технического комплекса, что значительно упростило его эксплуатацию.

На энергоблоке создана информационно-вычислительная система, имеющая расширенные возможности интерфейса, гибкость конфигурации, большой набор вспомогательных инструментов и неограниченный потенциал по расширению как обрабатываемых параметров, так и функционала работы.

Библиографический список

1. *Терехов Д. В., Данилов А. Д.* Проблема разработки принципов организации информационного обмена между иерархическими уровнями в многоуровневых АСУТП // Информационные технологии моделирования и управления. 2021. Т. 124. № 2. С. 151–157.

2. *Поваров В. П., Терехов Д. В., Данилов А. Д.* Особенности использования многоуровневой конфигурации специализированной информационной системы в задачах реализации принципа разнообразия систем безопасности 4-го блока Нововоронежской АЭС // Ядерная и радиационная безопасность. 2019. № S1. С. 41–45.

3. *Данилов А. Д., Синюков Д. С.* Механизм распределения данных о специальных транзакциях с оперативным контентом в реальном времени на основе кэширования в гетерогенных объектах распределенной сети // Информационные технологии моделирования и управления. 2021. Т. 125. № 3. С. 216–223.

4. *Терехов Д. В., Данилов А. Д.* Обработка потоков данных в информационных системах верхнего уровня управления процессами // Системы управления и информационные технологии. 2019. № 1 (75). С. 67–70.

5. *Поваров В. П., Бакиров М. Б., Данилов А. Д.* Автоматизированная система многопараметрического мониторинга параметров состояния энергетических установок АЭС. Воронеж: Научная книга, 2017. 276 с.

6. *Поваров В. П., Бакиров М. Б., Данилов А. Д.* Обработка данных в системе непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости критических элементов энергетических установок // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 1. С. 64–72.

7. *Данилов А. Д., Терехов Д. В.* Особенности архитектуры информационной системы реального времени // Системы управления и информационные технологии. 2018. № 4 (74). С. 49–54.

УДК 004.89; 004. 942

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

ПРИМЕНЕНИЕ СТАНДАРТА COBIT ПРИ ОЦЕНКЕ РИСКОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОМПАНИИ

При разработке стратегии информационной безопасности одной из основных задач является глубокий анализ бизнес-процессов и выделение бизнес-целей предприятия. Предлагаемая методика, построенная на адаптации стандарта COBIT совместно с методологией Coras, дает возможность составить стратегию информационной безопасности на основе анализа угроз, ресурсов, рисков и методов защиты.
Ключевые слова: *информационная безопасность, математическое моделирование, стандарт COBIT, оценка эффективности.*

T. N. Yelina*
PhD Sc. Econ., Associate Professor
V. A. Mylnikov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

APPLICATION OF THE COBIT STANDARD IN ASSESSING THE COMPANY'S INFORMATION SECURITY RISKS

When developing an information security strategy, one of the main tasks is a deep analysis of business processes and the allocation of business goals of the enterprise. The proposed methodology, based on the adaptation of the COBIT standard together with the Coras methodology, makes it possible to develop an information security strategy based on the analysis of threats, resources, risks and protection methods.
Keywords: *information security, mathematical modeling, COBIT standard, assessment efficiency.*

При разработке стратегии информационной безопасности любого предприятия необходимо внедрять проектируемые процессы в основные и вспомогательные бизнес-процессы. Поэтому одной из основных задач в этой области является глубокий анализ бизнес-процессов компании, выделение бизнес-целей и разработка стратегии, которая эффективно вписывается в общие направления бизнеса [1].

В настоящее время существует большое количество внутренних и международных стандартов в области информационных технологий и информационной безопасности, одним из которых является стандарт COBIT [2]. Данный стандарт является синтезом нескольких десятков стандартов и направлен на взаимное согласование целей управления компанией с решениями по обеспечению информационной безопасности и защиты информации, направленными на достижение этих целей. В отношении руководства к стратегии информационной безопасности возможны различные варианты. Руководство компании при определении целей бизнеса может не принимать во внимание актуальные требования безопасности, а может наоборот, уделять чрезмерное внимание вопросам защиты информации, не обращая внимание на то, как они будут вписываться в бизнес-процессы. Руководство компании может недооценивать или переоценивать риски информационной безопасности, что в равной степени приводит к значительному финансовому и качественному ущербу. Чтобы правильно оценить риски, необходимо проводить аудит информационной безопасности, который в свою очередь должен являться обеспечением соблюдения соответствующих правил и стандартов в компании.

Стандарт COBIT рассматривает процессы планирования, организация, приобретения, внедрения, эксплуатации, сопровождения, мониторинга и оценки следующих структурных элементов бизнеса: данные, приложения, технологии, оборудование и персонал. Согласно стандарта характеристиками информации являют-

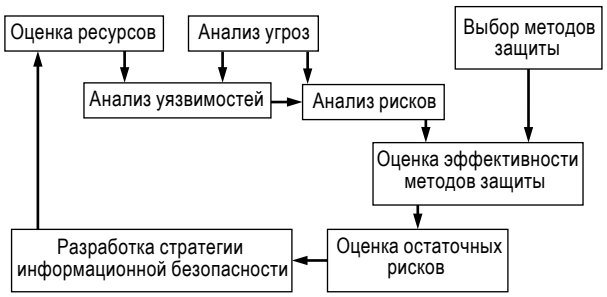


Рис. 1. Алгоритм оценки рисков информационной безопасности по методике COBIT

ся продуктивность, эффективность, конфиденциальность, целостность, согласованность, доступность, надежность. Модель оценки рисков информационной безопасности по COBIT основана на классической модели аудиторского цикла и представлена на рис. 1.

Программный пакет Coras [3] позволяет оценить риски информационной безопасности по методологии COBIT. Рассмотрим ее применение на примере коммерческого предприятия. Оценка ресурсов отражена на рис. 2. Анализ угроз информационной безопасности с определением причин инцидентов и нарушителей представлен в табл. 1.

На следующем этапе на основании построенной модели угроз с указанием источника, основного сценария угрозы и ресурсов строится диаграмма с характеристикой последствий осуществления угрозы (рис. 3).

На последнем этапе необходимо сопоставить источники угроз, угрозы и меры противодействия угрозам (рис. 4).

Таким образом, адаптация стандарта COBIT и его применение, например, совместно с методологией Coras, анализом бизнес-процессов компании, существующих ресурсов и организационной структуры дает возможность составить понятную, объяснимую и доказуемую стратегию информационной безопасности предприятия на основе анализа угроз, ресурсов, рисков и методов защиты.

Таблица 1

Анализ угроз информационной безопасности

Нарушитель	Угроза	Уязвимость
Нарушитель	Хищение/изменение информации на сервере, носителе	Отсутствие защиты от несанкционированного доступа; шифрования; ненадежных паролей
	Проникновение. Кража оборудования, документации	Отсутствие контрольно-пропускного режима; камер; замков
	Визуальный съем информации, подслушивание	Непродуманное расположение компьютеров и документации напротив окон; отсутствие шумоизоляции
	Съем информации с помощью ПЭМИН	Возможность подключения к устройствам
	Запись аудио- и видеоинформации с помощью СТС	Отсутствие контроля и наблюдения на посетителями; оборудования и мероприятий по обнаружению таких СТС
Сбои и ошибки в системе	Потеря информации; отсутствие доступа к информации	Несвоевременно обновление ПО; отсутствие копий
Вирусное ПО	Хищение/изменение/удаление информации на сервере и ПК	Отсутствие или несвоевременное обновление антивирусного ПО; установка нелицензированного/своего ПО; посещение вредоносных сайтов
Персонал	Хищение материальных носителей	Небрежное хранение документации
	Копирование/изменение информации на носителях	Простой пароль; отсутствие шифрования; копий
	Доступ к защищаемой информации	Ошибки администратора
	Разглашение информации	Отсутствие политики конфиденциальности
Стихийные бедствия	Потеря информации; повреждение носителей информации и оборудованию	Неразумное расположение носителей информации и оборудования; отсутствие пожарной сигнализации

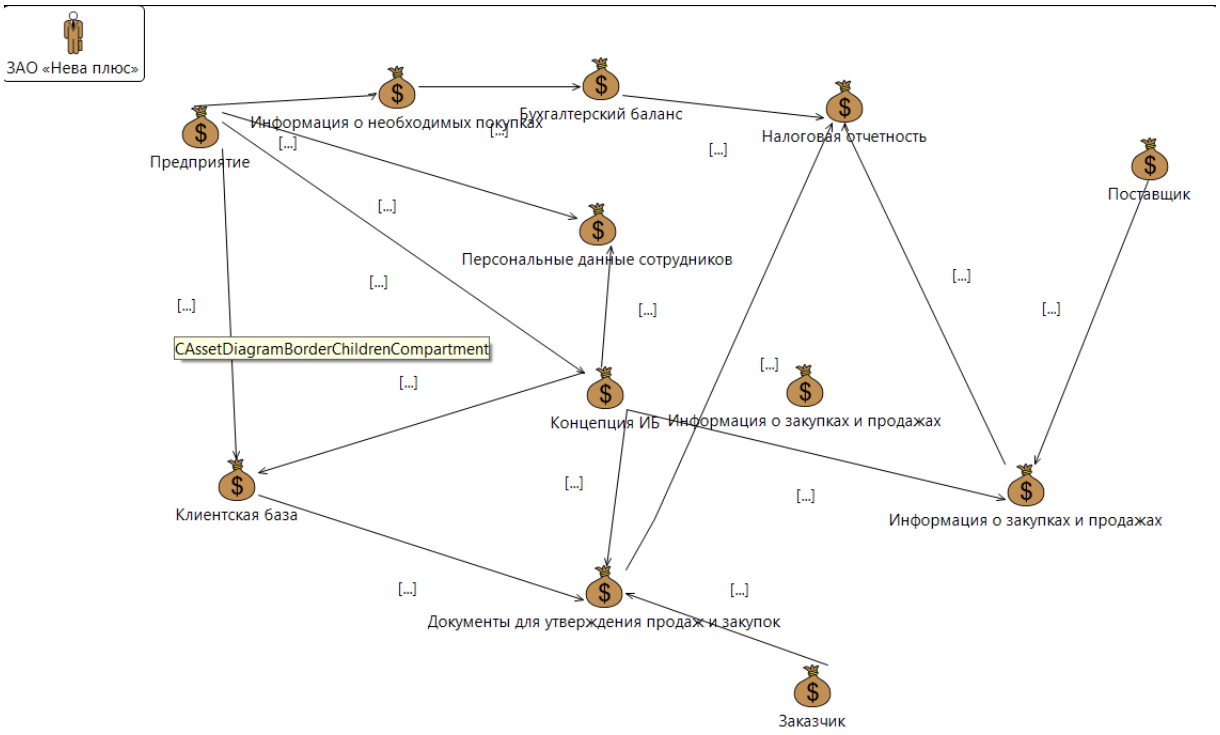


Рис. 2. Ресурсы предприятия в методологии COBIT

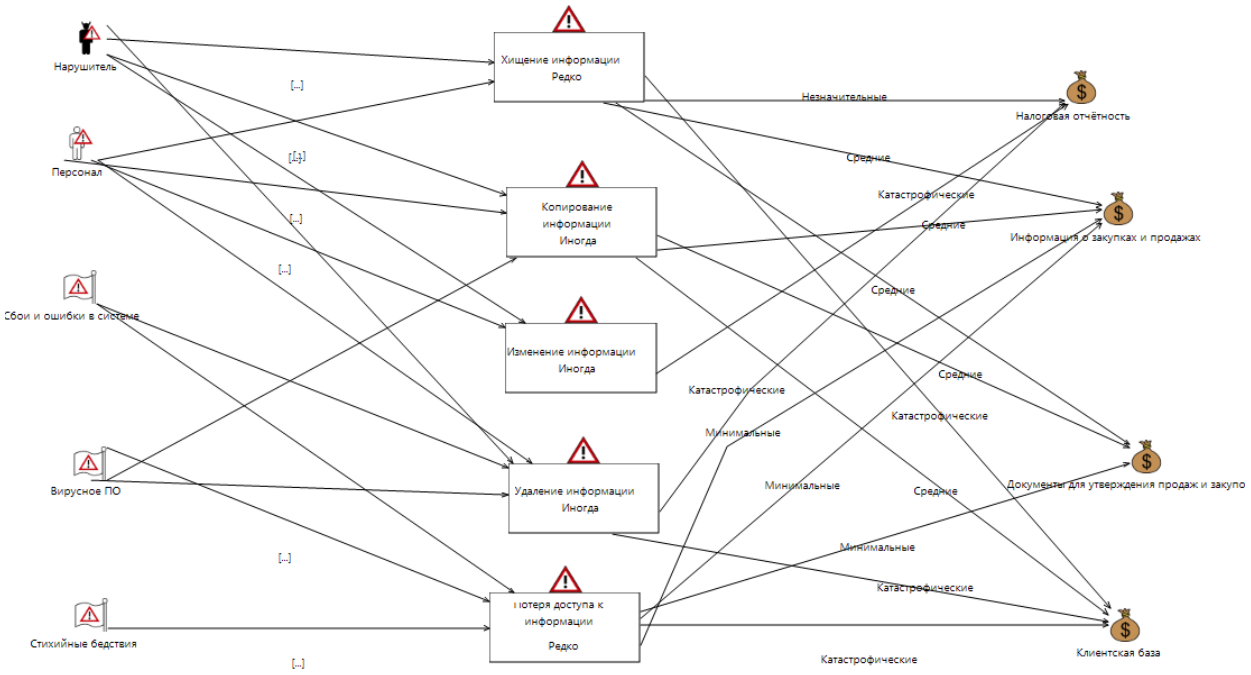


Рис. 3. Диаграмма угроз с характеристикой последствий их осуществления

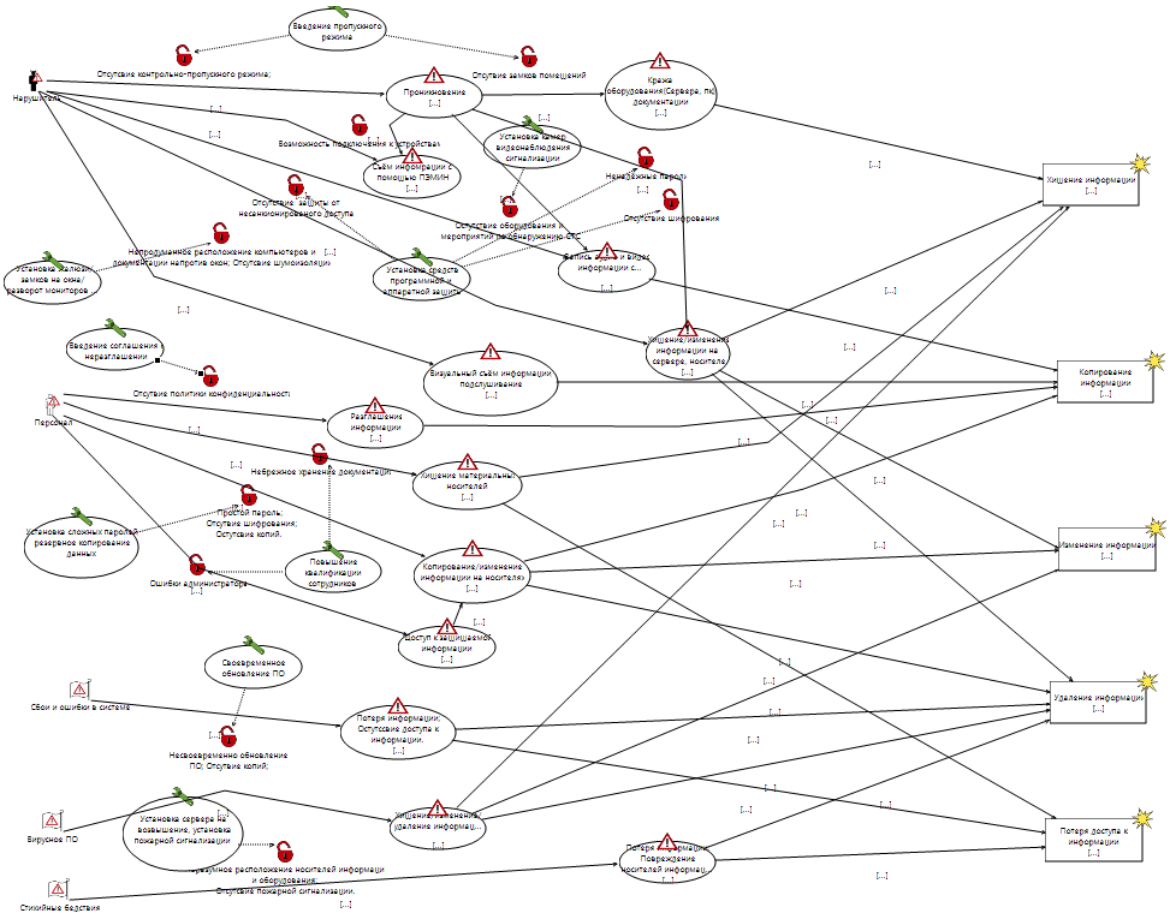


Рис. 4. Диаграмма угроз с методами защиты

Библиографический список

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. *Степура М. А.* Назначение и структура стандарта COBIT / Дневник науки. 2019. № 7 (31). С. 26.

3. *Teilans A., Romanovs A., Merkuryev Y.* Assessment of cyber physical system risks with domain specific modelling and simulation. SPIIRAS Proceedings. 2018. № 4 (59). С. 115–139.

УДК 004.89; 004. 942 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-42-46**

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

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ПРЕДПРИЯТИИ

При внедрении комплексной системы защиты информации на предприятии требуется оценка экономической эффективности целесообразности его реализации. Оценка результатов внедрения системы защиты представляет определенные трудности, так как часто его невозможно выразить в денежных единицах, и имеет явно выраженный вероятностный характер. Предлагаемая методика позволяет принять решение и осуществить обоснованный выбор проектов внедрения системы защиты информации.
Ключевые слова: *информационная безопасность, математическое моделирование, оценка экономической эффективности.*

T. N. Yelina*
PhD Sc. Econ., Associate Professor
V. A. Mylnikov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE ECONOMIC EFFICIENCY OF THE IMPLEMENTATION OF A COMPREHENSIVE INFORMATION SECURITY SYSTEM AT THE ENTERPRISE

When implementing a comprehensive information security system at an enterprise, an assessment of the economic efficiency of the feasibility of its implementation is required. Evaluation of the results of the implementation of the protection system presents certain difficulties, since it is often impossible to express it in monetary units and has a pronounced probabilistic character. The proposed methodology allows you to make a decision and make an informed choice of projects for the implementation of an information security system.
Keywords: *information security, mathematical modeling, assessment of economic efficiency.*

Комплексная система защиты информации любого предприятия – это проект, требующий значительных финансовых затрат. Как любой инвестиционный проект, он требует оценки экономической эффективности для принятия решения о целесообразности его реализации. В соответствии с методическими рекомендациями об оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования [1] для оценки эффективности существует система интегральных показателей, на основании которых принимается решение о реализации проекта.

Согласно методике [1] все потоки от реализации проекта делятся укрупненно на две части: затраты и результаты. К затратам относятся первоначальные единовременные затраты на внедрение системы защиты информации и текущие затраты на владение этой системой. К результатам относятся положительные потоки от реализации системы. Оценка результатов представляет определенные трудности, так как, во-первых, часто результаты от повышения информационной безопасности невозможно выразить в денежных единицах, а во-вторых, оценка результатов выполняется с высокой долей неопределенности. В основном положительный поток от реализации комплексной системы защиты информации (КСЗИ) достигается за счет следующих результатов:

1) снижение затрат труда персонала предприятия на поддержание требуемого уровня информационной безопасности информационной системы;

2) снижение финансового ущерба от уменьшения количества инцидентов информационной безопасности;

3) нефинансовые результаты, такие как повышение репутации фирмы, доверия клиентов, выход на новые рынки и т. д.

Первую группу результатов достаточно легко оценить. За счет реинжиниринга бизнес-процессов и их автоматизации, снижается их трудоемкость, которую можно выразить в денежных единицах, рассчитываемых как затраты на оплату труда соответствующего персонала. Но в то же время в реальных условиях затраты на оплату труда не могут быть снижены, так как, снижая заработную плату, предприятие может потерять квалифицированных сотрудников. Поэтому об экономии фонда заработной платы в результате внедрения системы информационной безопасности нельзя утверждать. Правильнее считать результатом высвободившееся рабочее время сотрудников, которое они могут потратить на другие производственные задачи.

Вторую группу результатов можно оценить только с достаточно высокой долей вероятности [2]. Поскольку оценить размер ущерба от конкретного еще не произошедшего инцидента, а также определить, произойдет ли этот инцидент в определенный период времени, с абсолютной точностью невозможно. Наибольшую точность здесь поможет достичь совместное применение методов экспертной оценки и статистического анализа. Результатом будет являться сумма произведений вероятности успешной реализации каждого инцидента (о. е) на степень защиты применяемых методов (о. е.) и на размер ущерба от реализации инцидента информационной безопасности (ден. ед.).

К сожалению, оценить в денежных единицах нефинансовые результаты реализации проекта не представляется возможным [3], так как любое предприятие – это открытая система, активно взаимодействующая с внешней средой: контрагенты, государственные органы власти, средства массовой информации, зарубежные организации-партнеры и т. д., поэтому на любое изменение позиции организации во внешней среде оказывают влияние огромное количество факторов, и невозможно выделить степень влияния только одного из них.

Для проведения оценки экономической эффективности в общем виде реализуется следующая последовательность шагов:

1. Определение длительности периода расчета.

2. Оценка: темпа инфляции и нормы дисконта; инвестиционных затрат; текущих затрат; результатов.

3. Расчет интегральных показателей эффективности проекта.

4. Сравнение расчетных показателей с нормативными значениями.

При определении длительности периода расчета во внимание принимаются следующие факторы:

- отрасль деятельности анализируемого предприятия;
- размер предприятия и длительность его функционирования;
- параметры внешней среды предприятия.

Слишком длительный период расчета приведет к неадекватности значений рассчитываемых показателей, так как спрогнозировать значения экономических параметров на длительный период невозможно. Выбор слишком короткого периода расчета может привести к слишком низким значениям интегральных показателей. В настоящее время для средней фирмы, выполняющей коммерческую деятельность, не связанную с государственной тайной, период расчета может находиться в пределах 1–2 лет. Для рассматриваемого примера выбрана продолжительность расчета 2 года (T=24 месяца).

Темп инфляции может определяться исходя из значений, взятых из официальных источников (Росстат), или собственных статистических оценок – в этом случае темп инфляции будет более высоким, но и более адекватным реальным показателям. Норма дисконта должна определяться как требуемая инвестором норма дохода на капитал. Так как инвестором выступает само предприятия, то норма дисконта определяется самим предприятием, но она не должна быть ниже ставки рефинансирования центрального банка России. Для рассматриваемого проекта темп инфляции составил U=8,39 % в год и 0,67 % в месяц [4], норма дисконта – E=8,5 % в год и 0,68 % в месяц [5].

Инвестиционный план может быть составлен с использованием диаграммы Ганта, для ее построения можно использовать MS Project или один из многочисленных онлайн сервисов. Пример диаграммы Ганта приведен на рис. 1.

Весь проект состоит из задач, ресурсов и назначений, объединяющих первые и вторые. В результате формируется стоимость и длительность инвестиционного этапа проекта. Общая продолжительность инвестиционного этапа составляет 52 дня. Суммарные затраты и вложения, необходимые для реализации проекта, составляют Inv=595 186 руб.

Эксплуатационный этап включает период с момента полного внедрения КСЗИ на предприятии и до момента ее вывода из эксплуатации либо до конца периода расчета. Во время эксплуатационного этапа необходимо, чтобы текущие эксплуатационные затраты были не выше результатов поступлений от проекта. Для определения величины поступлений была рассчитана примерная стоимость ущерба от реализации всех возможных угроз информационной безо-

ВРЕМЕННАЯ ШКАЛА

Сегодня | 29 Ноя '21 | 06 Дек '21 | 13 Дек '21 | 20 Дек '21 | 27 Дек '21 | 03 Янв '22 | 10 Янв '22 | 17 Янв '22 | 24 Янв '22 | 31 Янв '22 | 07 Фев '22

Начало Пт 26.11.21 — Добавьте задачи с датами на временную шкалу — Окончание Вт 08.02.22

ДИАГРАММА ГАНТА

	Режим задачи	Название задачи	Длительность	Начало	Окончание	Пред	Названия ресурсов	Затраты	Фиксированные затраты
0		**Инвестиционный план**	**52 дней**	**Пт 26.11.21**	**Вт 08.02.22**			**595 186,00 ₽**	**0,00 ₽**
1		**Системный анализ организации**	**9 дней**	**Пт 26.11.21**	**Чт 09.12.21**			**58 368,00 ₽**	**0,00 ₽**
2		Определение объектов защиты	1 день	Пт 26.11.21	Пт 26.11.21		Бизнес-аналитик ;Директор[60%]	9 440,00 ₽	0,00 ₽
3		Определение и классификация информационных активов	1 день	Пн 29.11.21	Пн 29.11.21	2	Бизнес-аналитик ;Директор[60%]	9 440,00 ₽	0,00 ₽
4		Анализ рисков информационной безопасности	2 дней	Вт 30.11.21	Ср 01.12.21	3	Бизнес-аналитик ;Сервер ;Компьютерное оборудование	11 488,00 ₽	0,00 ₽
5		Разработка мер обеспечения информационный безопасности	3 дней	Чт 02.12.21	Пн 06.12.21	4	Бизнес-аналитик	16 800,00 ₽	0,00 ₽
6		Разработка документа по стратегии	2 дней	Вт 07.12.21	Ср 08.12.21	5	Бизнес-аналитик	11 200,00 ₽	0,00 ₽
7		Предоставление документа по стратегии	0 дней	Чт 09.12.21	Чт 09.12.21	6		0,00 ₽	0,00 ₽
8		**Техническое задание**	**8 дней**	**Чт 09.12.21**	**Вт 21.12.21**			**48 720,00 ₽**	**0,00 ₽**
9		Выбор поставщиков услуг	2 дней	Чт 09.12.21	Пт 10.12.21	7	Консультант по ИБ[50%]	5 680,00 ₽	0,00 ₽
10		Разработка технического задания на внедрение методов и средств обеспечения информационный безопасности	4 дней	Чт 09.12.21	Вт 14.12.21	9НН	Ведущий инженер [50%]	12 000,00 ₽	0,00 ₽
11		Согласование технического задания с руководством организации	2 дней	Ср 15.12.21	Чт 16.12.21	10	Ведущий инженер [50%];Консультант по ИБ[50%];Директор[60%]	19 360,00 ₽	0,00 ₽
12		Разработка плана проведения работ	2 дней	Пт 17.12.21	Пн 20.12.21	11	Консультант по ИБ[50%];Ведущий инженер [50%]	11 680,00 ₽	0,00 ₽
13		Предоставление плана проведения работ	0 дней	Вт 21.12.21	Вт 21.12.21	12		0,00 ₽	0,00 ₽
14		**Заключение договоров на поставку и монтаж оборудования**	**26 дней**	**Вт 21.12.21**	**Ср 26.01.22**			**360 506,00 ₽**	**0,00 ₽**
15		Оформление заказа	2 дней	Вт 21.12.21	Ср 22.12.21	13	Директор[60%]	7 680,00 ₽	0,00 ₽
16		Оплата оборудования	4 дней	Чт 23.12.21	Вт 28.12.21	15	Бухгалтер [30%];Оборудование для пропускной системы [6 комп]; Оборудование для охранной системы[1 комп]; Оборудование для пожарной системы[1 комп]; Оборудование для системы видеонаблюдения [1 комп]; Сейф [1 шт]; Серверное оборудование [1 комп]; Шкафчики с замками для документации [8 шт]; Зеркальная пленка на окна [8 шт]	273 840,00 ₽	0,00 ₽
17		Прием оборудования	7 дней	Ср 29.12.21	Чт 06.01.22	16	Директор[60%]	26 880,00 ₽	0,00 ₽
18		Монтаж оборудования	7 дней	Пт 07.01.22	Пн 17.01.22	17	Рабочие[60%]	22 410,00 ₽	0,00 ₽
19		Пуско-наладочные работы	4 дней	Вт 18.01.22	Пт 21.01.22	18	Технические специалисты[200%];Сервер ;Компьютерное оборудова	19 776,00 ₽	0,00 ₽
20		Инструктаж по эксплуатации оборудования	2 дней	Пн 24.01.22	Вт 25.01.22	19	Технические специалисты[200%];Директор[60%]; Старший помощник[40%];Младшие помощники[6%]	9 920,00 ₽	0,00 ₽
21		Подписание акта о сдаче-приемке выполненных работ	0 дней	Ср 26.01.22	Ср 26.01.22	20		0,00 ₽	0,00 ₽
22		**Заключение контракта на оказание услуг по охране**	**35 дней**	**Чт 09.12.21**	**Чт 27.01.22**			**46 640,00 ₽**	**0,00 ₽**
23		Составление и заключение контракта на оказание охранных услуг	2 дней	Чт 09.12.21	Пт 10.12.21	10НН	Директор[60%]	27 680,00 ₽	20 000,00 ₽
24		Составление и заключение контракта на оказание услуг по охране от пожара	2 дней	Пн 13.12.21	Вт 14.12.21	10НН	Директор[60%]	17 680,00 ₽	10 000,00 ₽
25		Отправка уведомления в соответствующие организации о готовности систем охраны	1 день	Ср 26.01.22	Ср 26.01.22	21;23;2	Старший помощник[40%]	1 280,00 ₽	0,00 ₽
26		Получение уведомления о начале охраны объекта	0 дней	Чт 27.01.22	Чт 27.01.22	25		0,00 ₽	0,00 ₽
27		**Заключение договора оказания услуг по системному администрированию и техническому обслуживанию компьютерной техники и систем видеонаблюдения**	**3 дней**	**Пн 24.01.22**	**Чт 27.01.22**			**7 680,00 ₽**	**0,00 ₽**
28		Составление и заключение договора	2 дней	Пн 24.01.22	Ср 26.01.22	21ОО	Директор[60%]	7 680,00 ₽	0,00 ₽
29		Договор оказания услуг по системному администрированию заключен	0 дней	Чт 27.01.22	Чт 27.01.22	28		0,00 ₽	0,00 ₽
30		**Установка и натсройка лицензионного ПО**	**5 дней**	**Чт 27.01.22**	**Ср 02.02.22**			**58 408,00 ₽**	**0,00 ₽**
31		Приобретение лицензионного ПО	2 дней	Чт 27.01.22	Пт 28.01.22	29	Бухгалтер [30%];Лицензионное ПО[1 комп]; Системный администратор	52 520,00 ₽	0,00 ₽
32		Установка и настройка ПО	2 дней	Пн 31.01.22	Ср 02.02.22	31	Системный администратор ;Сервер ;Компьютерное оборудование	5 888,00 ₽	0,00 ₽
33		Подписание акта сдачи-приемки выполненных работ	0 дней	Ср 02.02.22	Ср 02.02.22	32		0,00 ₽	0,00 ₽
34		**Заключение договора на информационно-консультационное обслуживание**	**2 дней**	**Вт 01.02.22**	**Ср 02.02.22**			**7 680,00 ₽**	**0,00 ₽**
35		Составление и заключение договора на информационно-консультационное обслуживание	2 дней	Вт 01.02.22	Ср 02.02.22	33ОО	Директор[60%]	7 680,00 ₽	0,00 ₽
36		Договор на информационно-консультационное обслуживание заключен	0 дней	Ср 02.02.22	Ср 02.02.22	35		0,00 ₽	0,00 ₽
37		**Составление итогового отчета**	**3 дней**	**Чт 03.02.22**	**Вт 08.02.22**			**7 184,00 ₽**	**0,00 ₽**
38		Проведение учета поставленного оборудования и ПО	2 дней	Чт 03.02.22	Пн 07.02.22	33	Бухгалтер [30%];Системный администратор ;Сервер ; Компьютерное оборудование	3 984,00 ₽	0,00 ₽
39		Проведение учета заключенных договоров и контрактов	1 день	Чт 03.02.22	Чт 03.02.22	36	Бухгалтер [30%]	960,00 ₽	0,00 ₽
40		Проведение учета выполненных работ	1 день	Пт 04.02.22	Пт 04.02.22	39	Бухгалтер [30%];Старший помощник[40%]	2 240,00 ₽	0,00 ₽
41		Предоставление итогового отчета	0 дней	Вт 08.02.22	Вт 08.02.22	40;38		0,00 ₽	0,00 ₽

Рис. 1. Диаграмма Ганта инвестиционного проекта по разработке и внедрению КСЗИ на коммерческом предприятии

Таблица 1

Интегральные показатели оценки эффективности инвестиций

Показатель	Ед. изм.	Формула для расчета	Значение	
			Требуемое	Расчетное
Срок окупаемости (PB)	мес.	$PB = \frac{Inv}{CF_t}$	<24	4
Дисконтированный срок окупаемости (DPB)	мес.	$DPB = \sum_{t=1}^{T} \frac{CF_t(1+u)^{t-1}}{(1+e)^{t-1}} > Inv$	<24	8
Средняя норма рентабельности (ARR)	%	$ARR = \frac{\sum_{t=1}^{T} \frac{CF_t(1+u)^{t-1}}{(1+e)^{t-1}}}{T * Ivv}$	>0	0,06
Чистый дисконтированный доход (NPV)	руб.	$NPV = \sum_{t=1}^{T} \frac{CF_t(1+u)^{t-1}}{(1+e)^{t-1}} - Inv$	>0	234499
Индекс прибыльности (PI)	о. е.	$PI = \sum_{t=1}^{T} \frac{CF_t(1+u)^{t-1}}{(1+e)^{t-1}} / Inv$	>1	1,4
Внутренняя норма рентабельности (IRR)	%	$\sum_{t=1}^{T} \frac{CF_t(1+u)^{t-1}}{(1+IRR)^{t-1}} - Inv = 0$	>8,5	14,3

пасности на предприятии с применением методики [6], составившая R=227 300 руб. /мес.

Текущие затраты (Z) включают в себя:

• амортизационные отчисления – 2800 руб. /мес.;

• стоимость лицензий на программное обеспечение 3500 руб. /мес.;

• заработная плата сотрудников, которые будут взаимодействовать с КСЗИ, 3500 руб. /мес.;

• оплата по договорам 83 500 руб. /мес.

Итого текущие затраты составляют Z=93 300 руб. /мес.

В результате чистый денежный поток составил $CF=R-Z$=134 000 руб. /мес., а сумма денежных потоков на конец установленного горизонта исследования $CF \times T$=134 000 $\times$ 24=3 216 000 руб.

Методика [1] определяет шесть интегральных показателей для оценки эффективности инвестиционного проекта, результаты расчета которых приведены в табл. 1.

В результате анализа полученных значений можно сделать вывод об эффективности проекта по внедрению КСЗИ на предприятии. В этом случае данный проект обеспечит возврат инвестиций и обеспечит при этом требуемую норму доходности.

Возможны варианты частичного соответствия интегральных показателей требуемым значениям. В такой ситуации лицу, принимающему решение, нужно проанализировать рассчитанные значения показателей и сделать вывод либо о необходимости доработки КСЗИ, либо о наличии большого количества качественных результатов от внедрения системы, которые при оценке эффективности не были учтены. В случае если все интегральные показатели из табл. 1 не удовлетворяют нормативным значениям, должен быть сделан вывод о неэффективности данного проекта.

Данная методика поможет принимать решения в области внедрения систем защиты информации и осуществлять обоснованный выбор проектов внедрения КСЗИ.

Библиографический список

1. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов / Министерство экономики РФ, Министерство финансов РФ, Государственный комитет РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике. 21.06.1999. № ВК477. URL: /https://docs. cntd.ru/document/1200005634 (дата обращения: 07.01.2022).

2. *Мыльников В. А., Елина Т. Н.* Комплексная оценка эффективности конфигурации информационной системы // Завалишинские чтения '21. XVI Меж-

дународ. конф. по электромеханике и робототехнике. СПб., 2021. С. 315–318.

3. *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.

4. Росстат оценил инфляцию в России по итогам 2021 года. URL: https://ria.ru/20211229/inflyatsiya-1766068788. html (дата обращения: 08.01.2022).

5. Ключевая ставка Банка России. URL: https://cbr.ru/hd_base/KeyRate (дата обращения: 08.01.2022).

6. Методика определения угроз безопасности информации в информационных системах. URL: https://fstec.ru/component/%20attachments/download/812 (дата обращения: 04.01.2022).

7. *Елин Н. Н., Елина Т. Н.* Оптимизация инвестиций при финансировании комплекса энергосберегающих мероприятий из различных источников // Промышленная энергетика. 2011. № 12. С. 7.

УДК 004.89; 004. 942 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-47-53**

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ГРАФОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА РИСКОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

Приводятся методики определения рисков информационной безопасности и построения на ее основе комплексной системы защиты информации на примере нотариальной конторы. Предлагаемая методика построена на основе методов графового моделирования, модели рисков с полным перекрытием угроз и методики определения угроз информационной безопасности ФСТЭК России, в методике реализуется расчет эффективности системы защиты информации, что позволяет оценить окупаемость предлагаемых решений.
Ключевые слова: *информационная безопасность, математическое моделирование, графовое моделирование, оценка эффективности.*

T. N. Yelina*
PhD Sc. Econ., Associate Professor
V. A. Mylnikov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE USE OF GRAPH MODELING METHODS FOR THE ANALYSIS OF INFORMATION SECURITY RISKS OF THE ENTERPRISE

The methods of determining the risks of information security and building on its basis a comprehensive information protection system on the example of a notary office are given. The proposed methodology is based on graph modeling methods, risk models with full overlap of threats and methods for determining threats to information security, the methodology implements the calculation of the effectiveness of the information security system, which makes it possible to assess the payback of the proposed solutions.
Keywords: *information security, mathematical modeling, graph modeling, assessment efficiency.*

При построении комплексной системы защиты информации на предприятии основными задачами являются проведение системного анализа бизнес-процессов и потоков данных с целью определения объектов защиты и набора возможных угроз безопасности. Возможные угрозы безопасности выбираются из банка данных угроз безопасности информации Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК) России [1] и анализируются согласно методическому документу ФСТЭК России «Методика определения угроз безопасности информации» [2]. После определения угроз и объектов защиты нужно определить вероятность реализации угрозы на объект. Затем с помощью модели с полным перекрытием угроз [3] необходимо подобрать методы защиты, рассчитать их эффективность для каждой угрозы и оптимизировать этот набор путем группировки и исключения недостаточно эффективных. Предлагаемый алгоритм представлен на рис. 1.

Рассмотрим реализацию данной методики на примере нотариальной конторы, деятельность регламентируется Приказом Минюста России от 16.04.2014 № 78 «Об утверждении Правил нотариального делопроизводства», согласно которому нотариус в обязательном порядке обрабатывает и хранит персональные данные, а значит, его деятельность должна поддерживать определенный уровень информационной безопасности.

В кабинете нотариуса расположены рабочее место (включая персональный компьютер) нотариуса, место для совершения нотариальных сделок, рабочий сейф. В данном сейфе хранятся организационно-распорядительные документы, к которым относятся приказы и распоряжения (согласно ч. 2 Приказа Минюста России

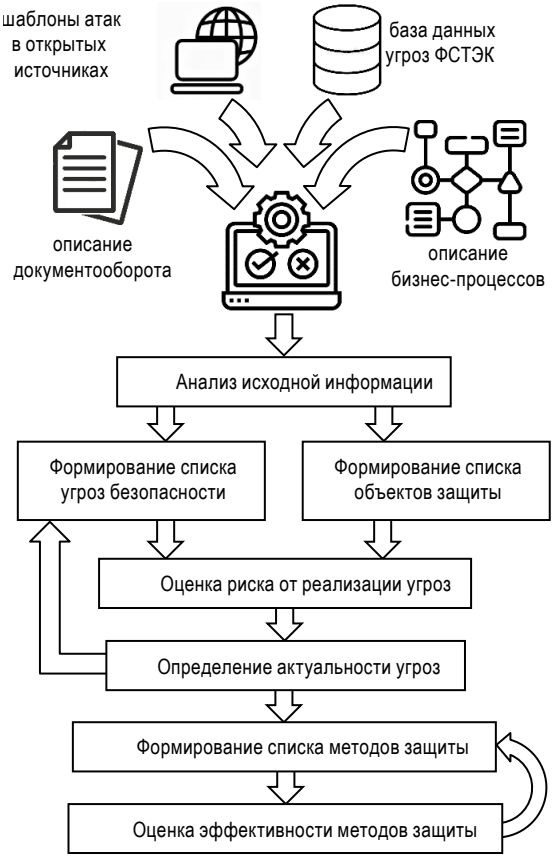


Рис. 1. Методика построения комплексной системы защиты информации на основе анализа угроз информационной безопасности

№ 78 от 16.04.2014), а также печати с воспроизведением Государственного герба Российской Федерации, штампы, бланки и усиленная квалифицированная электронная подпись нотариуса (ч. 5 Приказа Минюста России № 78 от 16.04. 2014). Кроме того, в этом кабинете находится рабочее место старшего помощника нотариуса, который занимается ведением реестров регистрации нотариальных действий (ч. 12 Приказа Минюста России № 78 от 16.04.2014), заполнением книг специального учета (например, учета наследственных дел, учета завещаний), обработкой писем, к которым относятся ответы на запросы, информационные сообщения, справки, уведомления и т. д. В серверной расположен сервер, к которому подключены персональные компьютеры нотариуса и помощников и на котором хранится документация в электронном виде. В архиве расположены картотеки номенклатурных дел (ч. 6–8 Приказа Минюста России № 78 от 16.04.2014), а также личные дела сотрудников организации и копии документов в печатном виде. Помощники нотариусов принимают документы у клиентов (их оригиналы или копии) и подготавливают всю необходимую для совершения нотариальной сделки документацию.

В результате анализа исходной информации были выделены следующие угрозы информационной безопасности (УБИ):

УБИ.004: Угроза сброса паролей

УБИ.008: Угроза восстановления и/или повторного использования аутентификационной информации

УБИ.010: Запуск вредоносной программы

УБИ.024: Изменения нарушителем режимов работы аппаратных элементов

УБИ.031: Получения нарушителем доступа к данным и функциям

УБИ.060: Удаления из хранилища некоторых обрабатываемых данных

УБИ.067: Неправомерного случайного или преднамеренного ознакомления пользователя с информацией

УБИ.088: Угроза несанкционированного копирования защищаемой информации

УБИ.090: Угроза несанкционированного создания учетной записи пользователя

УБИ.091: Угроза несанкционированного удаления защищаемой информации

УБИ.127: Выполнения неправомерных действий в системе от имени другого пользователя

УБИ.156: Раскрытия информации, хранящейся на утерянном носителе

УБИ.158: Утраты хранящейся на форматируемом носителе информации

В табл. 1 отражен процесс выделения объектов защиты путем анализа негативного воздействия от указанных угроз безопасности.

Взвешенный граф отношений угроза-объект представлен матрицей смежности в табл. 2. Каждое ребро графа оценивает вероятность реализации угрозы на объекте защиты за определенный период времени (например, год) (о. е.), а также размер ущерба от этой реализации (ден. ед.). Итоговый показатель по каждой паре угроза-объект отражает реальный размер ущерба в денежных единицах и определяется произведением ущерба на вероятность. Суммарный ущерб по всем парам оценивает общие потери от отсутствия системы информационной безопасности, и в рассматриваемом примере он составляет 5464 ден. ед. в год.

В результате проведенного анализа определяются актуальные угрозы безопасности, реализация которых может привести к нарушению конфиденциальности, целостности и доступности обрабатываемой в организации информации. Данный анализ должен проводиться с це-

Таблица 1

Формирование списка объектов защиты для нотариальной конторы

УБИ	Негативное воздействие	Объекты защиты	Реализация воздействия
УБИ.031 УБИ.060 УБИ.067 УБИ.088 УБИ.090 УБИ.091 УБИ.127 УБИ.156 УБИ.158	У1: Разглашение персональных данных	О1: База данных информационной системы с персональной информацией клиентов/сотрудников	Утечка данных по различным каналам
УБИ.004 УБИ.008 УБИ.010 УБИ.031 УБИ.060 УБИ.088 УБИ.090 УБИ.091 УБИ.127		О2: Удаленное автоматизированное рабочее место пользователя информационной системы	
УБИ.031 УБИ.060 УБИ.067 УБИ.088 УБИ.091		О3: Веб-приложение информационной системы	
УБИ.004 УБИ.008 УБИ.010 УБИ.024 УБИ.031 УБИ.060 УБИ.088 УБИ.091 УБИ.127	У2: Срыв запланированной сделки	О4: Автоматизированное рабочее место нотариуса	Модификация данных и отправка электронных писем с недостоверной информацией от имени нотариуса
УБИ.010 УБИ.067 УБИ.088		О5: Электронный почтовый ящик нотариуса	
УБИ.156 УБИ.158	У3: Утеря носителя информации	О6: Нотариальные документы на различных носителях	Утечка данных по различным каналам Модификация данных

лью определения эффективности разрабатываемых мер по защите информации [4]. Методы и способы защиты информации определяют конкретные меры и технологии, позволяющие решать вопросы обеспечения информационной безопасности объекта анализа. Каждое ребро графа табл. 2 необходимо перекрыть отдельным методом защиты. Результат генерации методов представлен в табл. 3. (Фактически в табл. 3 представлен трехдолный граф отношения «объект-метод-угроза», определяющий методы защиты, перекрывающие воздействие угрозы на объект защиты.) Эффективность метода показывает целесообразность его реализации для одного ребра «объект-угроза» и рассчитывается как отношение разности между предотвращаемым ущербом к стоимости метода, отнесенной к стоимости метода, выраженное в процентах.

Как видно по данным табл. 3, не все методы являются экономически целесообразными, но учитывая повторяемость методов для некоторых ребер «объект-угроза», существует возможность их укрупнения. Укрупнение методов позволит снизить их стоимость, что должно привести к повышению их эффективности (табл. 4).

В результат укрупнения список методов включил в себя следующие решения:

М1: аутентификация по SSH для доступа к серверу;

М2: периодическое создание бэкапа архива документов (например, с использованием RAID-массивов);

Таблица 2

Матрица смежности двудольного графа «объект-угроза»

	О1	О2	О3	О4	О5	О6	Итого по угрозам
УБИ.004	×	0,7×220=154	×	0,6 × 220=132	×	×	286
УБИ.008	×	0,5×180=90	×	0,6 × 230=138	×	×	228
УБИ.010	×	0,5×200=100	×	0,5 × 410=205	0,8 × 360=288	×	593
УБИ.024	×	×	×	0,5 × 390=195	×	×	195
УБИ.031	0,6×360=216	0,6×420=252	0,4 × 310=124	0,6 × 280=168	×	×	760
УБИ.060	0,4×520=208	0,4×350=140	0,5 × 190=95	0,7 × 180=126	×	×	569
УБИ.067	0,8×170=136	×	0,7 × 200=140	×	0,9 × 340=306	×	582
УБИ.088	0,5×220=110	0,5×200=100	0,3 × 230=69	0,4 × 120=48	0,6 × 380=228	×	555
УБИ.090	0,4×130=52	0,8×150=120	×	×	×	×	172
УБИ.091	0,3×240=72	0,4×260=104	0,4 × 240=96	0,4 × 120=48	×	×	320
УБИ.127	0,5×450=225	0,8×260=208	×	0,5 × 220=110	×	×	543
УБИ.156	0,3 × 250=75	×	×	×	×	0,5 × 420=210	285
УБИ.158	0,3 × 320=96	×	×	×	×	0,5 × 560=280	376
Итого по объектам	1190	1268	524	1170	822	490	5464

Таблица 3

Расчет эффективности методов защиты объектов от угроз информационной безопасности

Объект защиты	Угроза	Метод защиты	Стоимость метода, ден. ед.	Предотвращаемый ущерб, ден. ед.	Эффективность метода, %
О1	УБИ.031	М11 аутентификация по SSH для доступа к серверу	54	216	300
	УБИ.060	М12 периодическое создание бэкапа архива документов (например, с использованием RAID-массивов)	160	208	30
	УБИ.067	М13 установка файрвола (брандмауэра)	80	136	70
	УБИ.088	М14 установка файрвола (брандмауэра)	80	110	38
	УБИ.090	М15 аудит файлов с использованием системы обнаружения и предотвращения вторжений (IDS/IPS)	74	52	–30
	УБИ.091	М16 аутентификация по SSH для доступа к серверу	54	72	33
	УБИ.127	М17 установка файрвола (брандмауэра)	80	225	181
	УБИ.156	М18 установка файрвола (брандмауэра)	80	75	–6
	УБИ.158	М19 аутентификация по SSH для доступа к серверу	54	96	78
О2	УБИ.004	М21 использование программного средства защиты информации от НСД (например, «Снег-2.0») для контроля использования защищаемой информации и выявления попыток несанкционированного доступа к защищаемой информации	180	154	–14
	УБИ.008	М22 печать с автоматической маркировкой каждой страницы и автоматическим оформлением учетной карточки документа с указанием даты печати, учетных реквизитов, краткого содержания (наименования, вида, шифра, кода) и уровня конфиденциальности, фамилии лица, выдавшего документ, количества страниц и копий документа	120	90	–25

Продолжение табл. 3

Объект защиты	Угроза	Метод защиты	Стоимость метода, ден. ед.	Предотвращаемый ущерб, ден. ед.	Эффективность метода, %
	УБИ.010	М23 инструктаж сотрудников по ИБ, обеспечение конфиденциальности данных путем заключения соглашения о неразглашении конфиденциальных данных сотрудниками	40	100	150
	УБИ.031	М24 аудит файлов с использованием системы обнаружения и предотвращения вторжений (IDS/IPS)	74	252	241
	УБИ.060	М25 периодическое создание бэкапа архива документов (например,с использованием RAID-массивов)	160	140	–13
	УБИ.088	М26 аудит файлов с использованием системы обнаружения и предотвращения вторжений (IDS/IPS)	74	100	35
	УБИ.090	М27 использование антивирусного ПО	300	120	–60
	УБИ.091	М28 аудит файлов с использованием системы обнаружения и предотвращения вторжений (IDS/IPS)	74	104	41
	УБИ.127	М29 периодическое создание бэкапа архива документов (например, с использованием RAID-массивов)	160	208	30
О3	УБИ.031	М31 использование антивирусного ПО	300	124	–59
	УБИ.060	М32 установка файрвола (брандмауэра)	80	95	19
	УБИ.067	М33 периодическое создание бэкапа архива документов (например, с использованием RAID-массивов)	160	140	–13
	УБИ.088	М34 аудит файлов с использованием системы обнаружения и предотвращения вторжений (IDS/IPS)	74	69	–7
	УБИ.091	М35 инструктаж сотрудников по ИБ, обеспечение конфиденциальности данных путем заключения соглашения о неразглашении конфиденциальных данных сотрудниками	40	96	140
О4	УБИ.004	М41 аудит файлов с использованием системы обнаружения и предотвращения вторжений (IDS/IPS)	74	132	78
	УБИ.008	М42 использование ID-карты для аутентификации пользователя	152	138	–9
	УБИ.010	М43 использование антивирусного ПО	300	205	–32
	УБИ.024	М44 использование программного средства защиты информации от НСД (например, «Снег-2.0») для контроля использования защищаемой информации и выявления попыток несанкционированного доступа к защищаемой информации	180	195	8
	УБИ.031	М45 инструктаж сотрудников по ИБ, обеспечение конфиденциальности данных путем заключения соглашения о неразглашении конфиденциальных данных сотрудниками	40	168	320
	УБИ.060	М46 использование антивирусного ПО	300	126	–58
	УБИ.088	М47 использование ID-карты для аутентификации пользователя	152	48	–68
	УБИ.091	М48использование программного средства защиты информации от НСД (например, «Снег-2.0») для контроля использования защищаемой информации и выявления попыток несанкционированного доступа к защищаемой информации	180	48	–73

Окончание табл. 3

Объект защиты	Угроза	Метод защиты	Стоимость метода, ден. ед.	Предотвращаемый ущерб, ден. ед.	Эффективность метода, %
«	УБИ.127	М49 использование антивирусного ПО	300	110	–63
О5	УБИ.010	М51 использование антивирусного ПО	300	288	–4
	УБИ.067	М52 установка файрвола (брандмауэра)	80	306	283
	УБИ.088	М53 установка файрвола (брандмауэра)	80	228	185
О6	УБИ.156	М61 аудит файлов с использованием системы обнаружения и предотвращения вторжений (IDS/IPS)	74	210	184
	УБИ.158	М62 запрет использования сотрудниками внешних носителей, не предусмотренных первоначальной комплектацией	80	280	250

Таблица 4

Трехдольный граф с расчетом эффективности укрупненных методов защиты

Объект-угроза	Метод защиты	Стоимость метода, ден. ед.	Предотвращаемый ущерб, ден. ед.	Эффективность метода, %
О1-УБИ.031, О1-УБИ.091, О1-УБИ.158	М1	54	384	611
О1-УБИ.060, О2-УБИ.060, О2-УБИ.127, О3-УБИ.067	М2	160	696	335
О1-УБИ.067, О1-УБИ.088, О1-УБИ.127, О1-УБИ.156, О3-УБИ.060, О5-УБИ.067, О5-УБИ.088	М3	80	1175	1369
О1-УБИ.090, О2-УБИ.031, О2-УБИ.088, О2-УБИ.091, О3-УБИ.088, О4-УБИ.004, О6-УБИ.156	М4	74	919	1142
О2-УБИ.004, О4-УБИ.024, О4-УБИ.091	М5	180	397	121
О2-УБИ.008	М6	120	90	–25
О2-УБИ.010, О3-УБИ.091, О4-УБИ.031	М7	40	364	810
О2-УБИ.090, О3-УБИ.031, О4-УБИ.010, О4-УБИ.060, О4-УБИ.127, О5-УБИ.010	М8	300	973	224
О4-УБИ.008, О4-УБИ.088	М9	152	186	22
О6-УБИ.158	М10	80	280	250

М3: установка файрвола (брандмауэра);

М4: аудит файлов с использованием системы обнаружения и предотвращения вторжений (IDS/IPS);

М5: использование программного средства защиты информации от НСД (например, «Снег-2.0») для контроля использования защищаемой информации и выявления попыток несанкционированного доступа к защищаемой информации;

М6: печать с автоматической маркировкой каждой страницы и автоматическим оформлением учетной карточки документа с указанием даты печати, учетных реквизитов, краткого содержания (наименования, вида, шифра, кода) и уровня конфиденциальности, фамилии лица, выдавшего документ, количества страниц и копий документа;

М7: инструктаж сотрудников по ИБ, обеспечение конфиденциальности данных путем заключения соглашения о неразглашении конфиденциальных данных сотрудниками;

М8: использование антивирусного программного обеспечения;

М9: использование ID-карты для аутентификации пользователя;

М10: запрет использования сотрудниками внешних носителей, не предусмотренных первоначальной комплектацией.

В результате расчета эффективности методов защиты можно сделать вывод об актуальности

всех методов, кроме М6, стоимость которого превышает возможный ущерб от его отсутствия. Поэтому данный метод можно исключить из рассмотрения либо заменить на совокупность методов М5 и М7.

Таким образом, предложенная методика, основанная на методе полного перекрытия угроз, позволяет сформировать комплексную систему защиты информации на предприятии с обоснованием эффективности применяемых методов путем перекрытия ими возможного ущерба от угроз информационной безопасности.

Библиографический список

1. Банк данных угроз безопасности информации ФСТЭК России. URL: https://bdu. fstec.ru/threat (дата обращения: 05.01.2022).

2. Методика определения угроз безопасности информации. URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400325044 (дата обращения: 05.01.2022).

3. *Елина Т. Н., Мыльников В. А.* Модель безопасности облачного сервиса с полным перекрытием угроз // Завалишинские чтения'20: сб. докладов. СПб.: ГУАП, 2020. С. 313–316.

4. *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.

УДК 629.7.08

С. Ф. Скорина*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АРХИТЕКТУРНО-ИНФОРМАЦИОННАЯ КОНЦЕПЦИЯ КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ МАШИНЫ ДЛЯ ПРОТИВООБЛЕДЕНИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Обоснована необходимость и рассмотрены подходы к проведению комплексной модернизации специализированного транспортного средства для противообледенительной обработки воздушных судов.
Ключевые слова: *модернизация, противообледенительная обработка, воздушное судно, информационное обеспечение.*

S. F. Skoryna*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ARCHITECTUAL AND INFORMATION CONCEPT FOR THE COMPREHENSIVE OF THE AIRCRAFT DE-ISING MACHINE

The necessity s substantiated and approaches to carrying out a comprehensive modernization of a specialized vehicle for anti-icing treatment of aircraft are considered.
Keywords: *modernization, de-icing treatment, aircraft, information support.*

Дальнейшее повышение эффективности использования воздушного транспорта неразрывно связано с обеспечением его всепогодности и возможностью выполнения плановых полетов в сложных метеорологических условиях. Около 40 % территории Российской Федерации расположено в высоких широтах, для которых характерно короткое лето, продолжительная зима и достаточно длительные отрезки времени, приходящиеся на осень, зиму и весну. Для осенне-зимне-весеннего сезона характерны температурные качели, сопровождающиеся не только частыми и значительными изменениями модуля температуры, но и неоднократные переходы температуры от плюсовых к минусовым значениям и обратно. Перечисленные обстоятельства усугубляют потенциальную опасность возникновения обледенения воздушных судов (ВС) при предполетной подготовке в большинстве российских аэропортов, расположенных в высоких и средних широтах.

Обледенение ВС является опасным явлением, которое приводит к ухудшению аэродинамических характеристик и летных качества, нарушению центровки/устойчивости и управляемости, увеличению лобового сопротивления и расхода топлива.

Метеоусловия в районе аэродрома, способствующие интенсивному обледенению, усугубляются и сложной аэрологической обстановкой. Последняя обусловлена отсутствием в районе стоянки ВС достаточного количества сооружений в виде функциональных зданий аэропорта и естественных препятствий в виде лесополос, рельефа местности и т. п. Совокупность ветровых воздействий наряду с температурным фоном окружающей среды создают дополнительные предпосылки для возникновения обледенения. Следует также учитывать, что независимо от уровня автоматизации процессов проведения противообледенительной обработки соответствующие технические средства относятся к классу эргатических систем, функционирование которых происходит с участием человека-оператора, осуществляющего технологический процесс с помощью специализированной техники, расположенной на транспортном средстве (автомобиле).

Для специализированного транспортного средства с размещенным на нем оборудованием для проведения противообледенительной обработки среди технических работников аэропортов сложилось устойчивое сленговое, но отражающее суть, короткое название англоязычно-

го происхождения – деайсер. Участие человека в технологическом процессе обработки ВС определяет насущную необходимость учета так называемого человеческого фактора, со всеми характерными проблемами. Все это определяет целесообразность и актуальность использования комплексного, системного подхода к модернизации специализированных средств, предназначенных для выполнения предполетной противообледенительной обработки ВС. Насущная необходимость проведения модернизации применяемых в аэропортах деайсеров и изменения технологии выполнения соответствующих работ подтверждает и произошедшая в 2 декабря 2021 года в России предпосылка к летному происшествию с пассажирским ВС Airbus A321 авиакомпании S7, летевшему из Магадана в Новосибирск. Это происшествие могло закончится катастрофой ВС, гибелью всех 199 пассажиров и 7 членов экипажа [1].

Расследование инцидента показало, что противообледенительная обработка была выполнена с нарушениями регламентированной технологии. Это привело к образованию льда во время взлета в приемниках полного воздушного давления информационного комплекса воздушно-скоростных параметров (ИК ВСП), нарушению ламинарного течения воздушного потока, к искажению информации о истинной воздушной скорости, отключению автопилота и автомата тяги. В результате угловые эволюции ВС по крену и тангажу достигали 40–45°, самолет потерял 2700 м высоты, заход на посадку и саму посадку пришлось осуществлять в ручном режиме.

Поэтому задача совершенствования и повышения эффективности работ по проведению противообледенительной обработке ВС перед вылетом является значимой и актуальной. Результатом этого может стать повышение экономической эффективности деятельности любого авиатранспортного предприятия. При этом обеспечивается гарантированный дополнительный вклад в решение главной задачи авиационного транспорта – обеспечение безопасности выполнения полетов.

Сегодня на рынке техники для предполетного обслуживания ВС представлены многочисленные образцы деайсеров импортного (GLOBAL Ground Support, Safeatro, WESTERGAARD, LAS-1) и отечественного производства (Гейзер, ПМ, МЕ) [2]. Из-за проблем, обусловленных санкционной политикой западных стран, представляется целесообразным как с технических, так и с экономических позиций, рассмотреть основные направления проведения комплексной модернизации отечественной техники.

Анализ тактико-технических характеристик деайсеров отечественного и импортного производства выявил ряд характерных особенностей. В целом и те, и другие деайсеры успешно выполняют возложенные на них функции по проведению противообледенительной обработке ВС [3]. При этом параметры, характеризующие процесс обработки с помощью импортных и отечественных систем, такие как объем баков с рабочей жидкостью, производительность, высота подъема кабины с форсунками и оператором и др., практически не отличаются.

Основные отличия касаются наличия так называемых сервисных функций, которые, с одной стороны, обеспечивают комфортные условия работы оператора, с другой – способствуют непосредственно повышению эффективности выполняемых работ и безопасности полетов в сложных метеоусловиях, уменьшают потенциальную опасность влияния человеческого фактора. Реализуются эти сервисные функции за счет совершенствования архитектуры информационного обеспечения деятельности оператора путем оснащения деайсера дополнительными сенсорами, которые контролируют параметры выполняемого технологического процесса. К таким датчикам относятся:

- датчики температуры окружающего воздуха, рабочей жидкости, воздуха в кабине оператора и водителя;
- датчики давления рабочей жидкости в баке и на входе распределительной форсунки;
- счетчики моточасов (наработки) транспортного средства, компрессоров и насосов в составе деайсера;
- многочисленные сенсоры встроенной системы контроля и диагностики технического состояния основных агрегатов и систем:
- датчики системы аварийного оповещения при возникновении предотказового состояния основных агрегатов и возникновения опасного сближении ВС с распределительной форсункой.

Очевидно, что при таком многообразии источников разноплановой информации и необходимости ее дальнейшего эффективного использования деайсер должен быть оснащен специализированным вычислительным устройством обработки и представления информации оператору и водителю.

Анализ продукции современного отечественного приборостроения свидетельствует об отсутствии, как таковой, проблемы импортозамещения, поскольку все вышеупомянутые датчики, устройства обработки и отображения информации в достаточном количестве и необходимого качества выпускаются российскими предприя-

тиями и могут найти применение при комплексной модернизации российских деайсеров [4]. При этом представляется целесообразным при проведении комплексной модернизации или при выпуске новых моделей деайсеров дооснастить их следующими компонентами:

• для осуществления текущего контроля соблюдения технологии обработки ВС необходим расходомер, позволяющий получать информацию о расходе используемой для обработки рабочей жидкости в единицу времени. Эта информация также позволяет контролировать оставшиеся в баках объемы;

• плотномер, информация от которого может использоваться для входного контроля используемой рабочей жидкости для обработки ВС на соответствие заданной плотности и коррекции показаний расходомера;

• датчики стояночного курса ВС и деайсера. Информация от этих сенсоров необходима для подсистемы недопущения проведения противообледенительной обработки в случае, когда курсовые углы ВС и деайсера отличаются на 180°. При таком расположении объектов, как представлено на рис. 1, возникает возможность попадания противообледенительной жидкости в приемники воздушного давления ИК ВСП и в компрессоры низкого давления двигателей ВС;

• подсистема контроля допустимой минимальной дистанции между распределительной форсункой деайсера и ВС. В качестве источников информации о фактическом расстоянии между объектами могут найти применение как лазерные дальномеры, так и датчики машинного зрения. Одной из важных характеристик последних является простота и инвариантность к условиям применения;

• весьма полезной для строгого соблюдения технологического процесса может быть и информация о фактической температуре обрабатываемых поверхностей ВС, которая может отличаться от температуры окружающей среды из-за использования экипажем штатных, встроенных систем предотвращения обледенения. Указанную информацию можно получить от тепловизора или более дешевых пирометров.

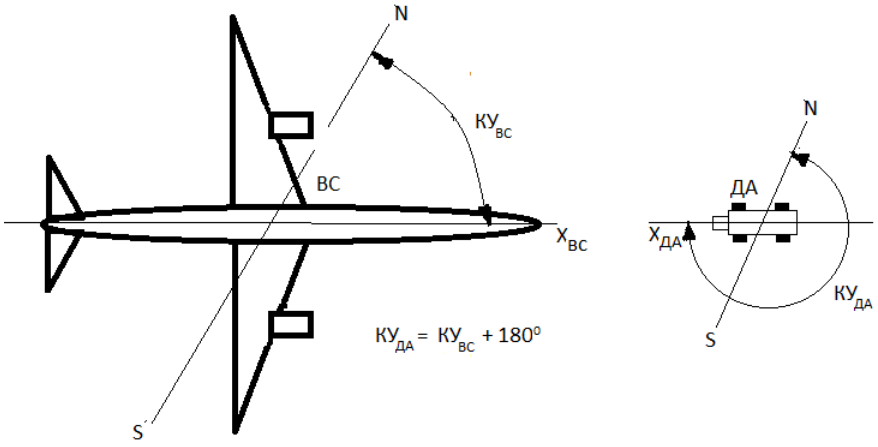


Рис. 1. Схема взаимного расположения ВС и деайсера на встречных курсах

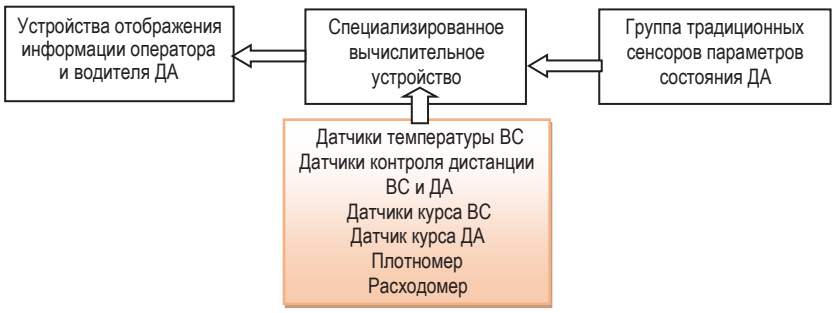


Рис. 2. Архитектурно-информационная концепция модернизации деайсера

С учетом изложенных предложений архитектурно-информационная концепция модернизации деайсера представлена на рис. 2.

При использовании для изготовления большинства упомянутых выше датчиков типовых элементов электронной компонентной базы и хорошо отработанной технологии производства микро-электромеханических систем, обеспечивающей микроминиатюризацию и исключительно низкую стоимость единицы продукции, для обеспечения высокой надежности деайсера могут быть применены принципы структурного резервирования сенсоров с наибольшими значениями интенсивностей отказов.

Библиографический список

1. Федеральное агентство воздушного транспорта. URL: https://www.favt. gov.ru/ (дата обращения: 10.01.2022).

2. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации / Под ред. К. Г. Абрамовича, А. А. Васильева. Л., 1985. 301 с.

3. *Сторожук М. В.* Наземное обледенение воздушных судов: Меры по предупреждению авиационных происшествий // Научный сборник МГТУ ГА. 2015. № 219. С. 93–100.

4. Онлайн журнал. Датчики и сенсоры: Практика использования, теоретические основы. Современные тенденции. URL: http://www.datchikisensor. narod. ru/ (дата обращения: 28.12.2021).

УДК 004.75

С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
И. А. Воропаев*
ассистент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

О ВНЕДРЕНИИ ПРОВЕРЯЕМЫХ УЧЕТНЫХ ДАННЫХ (VC) И ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ИДЕНТИФИКАТОРОВ (DID) В СИСТЕМУ АУТЕНТИФИКАЦИИ

В статье рассматриваются наиболее широко используемые протоколы авторизации. Описывается структура идентификации, суверенная идентичность (Self-Sovereign Identity, SSI) и ее наиболее широко используемые стандарты реализации, такие как проверяемые учетные данные (Verifiable Credentials, VC) и децентрализованные идентификаторы (Decentralized identifiers, DIDs). Представлены варианты внедрения данных стандартов в существующую реализацию протоколов.
Ключевые слова: *Self-Sovereign Identity, проверяемые учетные данные, децентрализованные идентификаторы.*

S. V. Solyonyi*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
I. A. Voropaev*
Assistant
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ABOUT THE IMPLEMENTATION OF VERIFIED CREDENTIALS (VC) AND DECENTRALIZED IDENTIFIERS (DID) IN THE AUTHENTICATION SYSTEM

This article reviews the main and mostly used authorization protocols. It describes the identity framework, Self-Sovereign Identity (SSI) and its most widely used implementation standards, such as Verifiable Credentials (VC) and Decentralized Identifiers (DIDs). Options for implementing these standards in the existing implementation of the protocols are presented.
Keywords: *Self-Sovereign Identity, verifiable credentials, decentralized identities.*

Историю развития систем аутентификации пользователя можно разбить на несколько этапов [1]. На заре веб-приложений каждое приложение имело свою базу данных логинов и паролей пользователей. Идентификация пользователя происходила по введенным учетным данным при авторизации. Затем на смену пришел LDAP (Lightweight Directory Access Protocol). Это открытый протокол, используемый для хранения и получения данных из каталога с иерархической структурой. Обычно используется для хранения информации об организации, ее активах и пользователях [2].

Следующей волной стало появление, широко применяемой сейчас, системы Федеративного управления идентификацией (Federated Identity Management, FIM). Она делегирует проверку подлинности личности, запрашиваемой доступ к приложению, третьей стороне, что позволяет снизить нагрузку на приложение и решает проблему децентрализации учетных данных пользователей [3].

Основным недостатком данной системы является ограниченный контроль над тем, как данные хранятся и используются третьей стороной. Это порождает свои неудобства в использовании данной системы [4].

- Компании заинтересованы в получении финансовой выгоды от хранения данных и предоставления федеративного входа и могут, например, собирать данные о посещаемых ваши сайтах, чтобы затем продавать данную информацию рекламным агентствам.
- Все данные хранятся на центральных серверах и их взлом приводит к утечке личной информации.
- Данный способ аутентификации зависит от доступности сервера. Если у поставщика услуг произойдет технический сбой или он приостановит свою деятельность, пользователи не смогут использовать его федеративный вход.

Возможным решением этих проблем является суверенная личность (Self-Sovereign Identity,

SSI), структура идентификации, которая позволяет пользователям определять, где хранятся их данные, как они используются и кому они доступны.

SSI не зависит от конкретной технологии и может быть реализован различными способами. Однако рекомендуется использовать следующие технологии.

1. Технология распределенного реестра (Distributed Ledger Technology, DLT), обычно это технология блокчейн.

2. Два стандарта Консорциума Всемирной Паутины (World Wide Web Consortium, W3C) – децентрализованные удостоверения (Decentralized Identifiers, DID) и проверяемые учетные данные (Verifiable Credentials, VCs).

Распределенный реестр (Distributed Ledger Technology) – это база данных, которая распределена между несколькими сетевыми узлами или вычислительными устройствами [5].

Каждый сетевой узел получает данные из других узлов и хранит полную копию реестра. Обновления происходят независимо друг от друга.

Ключевая особенность распределенного реестра – отсутствие единого центра управления. Каждый сетевой узел составляет и записывает обновления реестра независимо от других узлов. Затем они голосуют за обновления, чтобы удостовериться, что большинство узлов согласно с окончательным вариантом. Голосование и достижение согласия в отношении одной из копий реестра, называемой консенсусом. Этот процесс выполняется автоматически с помощью алгоритма консенсуса. Алгоритм консенсуса программно гарантирует невозможность подделки данных при определенной доле достоверных узлов.

Как только консенсус достигнут, распределенный реестр обновляется, последняя согласованная версия реестра сохраняется в каждом узле.

Децентрализованный идентификатор (DIDs) – это глобальный уникальный идентификатор, предназначенный для того, чтобы отдельные лица и организации могли генерировать свои собственные идентификаторы, используя системы, которым они доверяют [6].

Он помогает пользователям представить себя, не обращаясь к централизованным реестрам удостоверений личности. Можно сказать, данный идентификатор заменит работу нотариуса, предоставляя в качестве доказательства подлинности документа, прав на его владение криптографические доказательства, такие как цифровые подписи, представляющие собой пару открытого и закрытого ключей.

DIDs состоит из уникального идентификатора и связанного с ним документа DID. Уникальный идентификатор используется для поиска документа DID и имеет синтаксис в соответствии с определением W3C следующий: «Схема: Метод: Идентификатор метода». Метод определяет, как и где будет осуществляться поиск DID. На текущий момент существует 9 зарегистрированных методов Sovrin, Bitcoin Reference, Ethereum, uPort, Blockstack, Veres One and IPFS – все они являются блокчейнами (или, если быть более точным, «технологиями распределенного реестра»). Метод в DID будет определять, какой из них используется, и, соответственно, какой протокол DIDs необходимо использовать для получения документа.

Документ DID – это объект JSON-LD (упрощенная форма для передачи связанных данных) который хранится в каком-то центральном месте, чтобы его можно было легко найти. Он состоит из:

- метки времени,
- указания времени создания,
- криптографического доказательства того, что документ DID действителен,
- списка криптографических открытых ключей,
- списка способов, которыми DID можно использовать для аутентификации,
- списка сервисов, где можно использовать DID,
- любого количества внешних расширений.

В документе DID нет личной информации: ни имени пользователя, ни адреса, ни номера телефона. Она находится в так называемых поддающихся проверке учетных данных (VCs). Последние представляет собой электронный эквивалент физических учетных данных, которые криптографически безопасны, поддаются проверке с помощью машин и гарантируют конфиденциальность за счет включения таких методов, как минимальное раскрытие информации и доказательство с нулевым разглашением (ZKP, Zero-Knowledge Proof).

VCs и DIDs связаны следующим образом [7].

Чтобы защитить свою безопасность и целостность, проверяемые учетные данные имеют цифровую подпись эмитента. Когда верификатор получает проверяемые учетные данные, он может проверить подпись учетных данных, чтобы убедиться, что они были выданы реальным эмитентом и не были подделаны. Поэтому верификатору требуется доступ к открытым ключам эмитента.

Инфраструктура открытого ключа, необходимая для проверки проверяемых учетных данных, предоставляется стандартом DIDs.

Эмитент (issuser) создает VCs, который обязан включать свой идентификатор и идентификатор запрашивающего пользователя, и ставит на них свою цифровую подпись.

Для каждого верификатора пользователь может создать отдельный набор учетных данных, которые называются поддающееся проверке представление (Verifiable Presentation, VP). Он также подписывает их, используя свой открытый ключ.

При получении верификатор в первую очередь собирает документы DID эмитента и пользователя, если VP содержит несколько учетных данных. Используя прикрепленные ключи, верификатор проверяет действительно ли эмитент и пользователь является ее владельцем. Если это условие выполняется, учетные данные считаются проверенными и отправляются обратно владельцу.

В [8] были сформированы принципы SSI, направленные на обеспечение контроля пользователей в системе идентификации, которая сочетает в себе прозрачность, конфиденциальность и справедливость.

1. *Существование*. SSI должен основываться на физических данных и не должен существовать исключительно в цифровом мире.

2. *Контроль*. Пользователи должны полностью самостоятельно контролировать свои личные данные, использовать их, обновлять ее или даже скрывать.

3. *Доступ*. Вся личная информация должна быть легко доступны для пользователя. Никакие личные данные не должны быть сокрыты от пользователя.

4. *Прозрачность*. Системы и алгоритмы должны быть прозрачными. Решения SSI и их алгоритмы должны обеспечивать прозрачность для внешнего аудита в части их функционирования, управления и обновления.

5. *Постоянство*. Идентичность должна быть долговечной. Идентификационные данные могут быть удалены только пользователем. Заявки можно обновлять и удалять, но идентификационные данные, принадлежащие этим заявкам, должны быть долговечными.

6. *Портативность*. Пользователь должен иметь возможность переносить свои личные данные на другую платформу. Они не должны управляться исключительно третьей стороной, поскольку она может прекратить свою деятельность.

7. *Совместимость*. Идентичность должна быть как можно более широко используемой. Настоящий SSI можно использовать во всем мире и не ограничивается определенными нишами.

8. *Согласие*. Пользователи должны явно соглашаться на использование их личных данных.

9. *Минимализм*. Раскрытие личных данных должно быть сведено к минимуму. Только необходимые данные должны быть переданы при совместном использовании некоторой части данных. Например, сообщать только о том, что вам больше 18 лет, а не о дате вашего рождения. Это свойство хорошо согласуется с условием о нулевом разглашении.

10. *Защита*. Права пользователей должны быть защищены. Права и свободы личности имеют приоритет над потребностями сети.

11. *Доказуемость*. Должна быть предусмотрена возможность проверки данных, например, доверенными третьими сторонами.

Однако существуют проблемы, препятствующие и замедляющие создание полностью децентрализованной системы идентификации [9]. В [10] эти проблемы разделены на две основные группы: технические и не технические.

К первой группе можно отнести, во-первых, проблему базовых систем блокчейна. При регистрации DID необходимо отправить транзакцию. Для ее проверки требуется время и учитывая, что одно взаимодействие между двумя объектами может включать несколько взаимодействий блокчейна, важно тщательно оценить масштабируемость, эксплуатационные расходы и производительность базовой системы блокчейна.

Для решения этой проблемы было предложено использовать технологии консорциума [11]. Однако это означает, что набор участников, от которого зависит проверка DID, собран заранее. Это может противоречить идее децентрализованной системы.

Во-вторых, при создании DID связанные с ними закрытые ключи и VC должны где-то надежно храниться, чтобы их можно было использовать при необходимости. В настоящее время большинство решений заключаются в хранении таких ценных личных данных на устройствах пользователя, таких как смартфон, персональный компьютер или даже аппаратное устройство. Во многих случаях, когда секретный ключ утерян, повторное создание нового ключа и цифрового удостоверения может оказаться неосуществимым или бесполезным. Вопрос организации хранения ключей остается открытым.

Ко второй группе относятся проблемы, связанные с правовой стороной систем идентификации. Для внедрения новой модели необходима адаптация текущей инфраструктуры всех государственных учреждений, банков, поставщиков и т. д. Кроме того, с точки зрения бизнеса участники, предоставляющие решения по развертыванию и внедрению новой модели идентификации, должны проанализировать окупаемость инвестиций, возможное извлечение прибыли и реорганизовать свои бизнес-модели.

Помимо этого, принятие пользователем новой технологии может зависеть от таких факторов, как его знания, простота технологии, стоимость использования, готовность и т. д. От человека потребуется более серьезное образование, чтобы правильно и ответственно использовать децентрализованные системы.

Право каждого на получение идентификатора, учетных данных и использование их в новой архитектуре – еще один важный вопрос. К ним относятся уязвимые в условиях цифрового мира слои населения: малообеспеченные и малообразованные люди, инвалиды и т. д.

В данной статье была рассмотрена новая парадигма идентификации – суверенная личность (SSI). Она представляет собой продвинутую форму децентрализованной идентичности, при которой не только атрибуты идентичности остаются под контролем пользователя, но и данные, связанные с ними действия. Также были разъяснены принципы и составляющие такой парадигмы и рассмотрены основные проблемы и ограничения, связанные с широким применением данной модели.

Библиографический список

1. *Erdos M.* Behind The Login Screen: Understanding Web Authentication Protocols. URL: https://iam.harvard. edu/resources/behind-login-screen (дата обращения: 11.01.2022).

2. *Ellingwood J.* Understanding the LDAP Protocol, Data Hierarchy, and Entry Components. URL: https://www.digitalocean.com/community/tutorials/understanding-the-ldap-protocol-data-hierarchy-and-entry-components (дата обращения: 11.01.2022).

3. Federated Identity Management vs. Single Sign-On: What's the Difference? URL: https://www.okta.com/identity-101/federated-identity-vs-sso/ (дата обращения: 11.01.2022).

4. Compare and Contrast – Federated Identity as Self-sovereign Identity. URL: https://academy. affinidi.com/compare-and-contrast-federated-identity-vs-self-sovereign-identity-227a85cbab18 (дата обращения: 11. 01.2022).

5. Технология распределенных реестров. URL: https://neftegaz.ru/tech-library/vysokie-tekhnologii/654120-tekhnologiya-raspredelennykh-reestrov/ (дата обращения: 11. 01.2022).

6. Decentralized Identifiers (DIDs) v1.0. URL: https://www.w3.org/TR/did-core (дата обращения: 11.01.2022).

7. SSI Essentials: What are Decentralized Identifiers (DIDs) & Verifiable Credentials (VCs)? URL: https://gataca.io/blog/self-sovereign-identity-ssi-101-decentralized-identifiers-dids-verifiable-credentials-vcs (дата обращения: 11.01.2022).

8. *van Bokkem D., Hageman R., Koning G.* Self-Sovereign Identity Solutions: The Necessity of Blockchain Technology. 2019. 3 p.

9. *Soltani R.* A Survey of Self-Sovereign Identity Ecosystem. Security and Communication Networks. Vol. 2021, Article ID 8873429. 2021. 26 p.

10. *Dib O., Toumi K.* Decentralized Identity Systems: Architecture, Challenges, Solutions and Future Directions. Annals of Emerging Technologies in Computing. 2020. 15 p.

11. *Dib O., Brousmiche K.-L., Durand A.* Consortium Blockchains: Overview, Applications and Challenges. 2018. P. 51–64.

УДК 004. 9.62.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-62-66**

С. Г. Фомичева*
кандидат технических наук, профессор
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

КВАНТОВАЯ ОЦЕНКА ФАЗЫ УНИТАРНЫХ ОПЕРАТОРОВ

Приведены результаты реализации квантовых схем, позволяющих оценить значение собственных значений унитарных операторов при выполнении квантовых алгоритмов. Собственные значения унитарных операторов используются при оценке фаз унитарных операторов, измерение которых при выполнении квантовых вычислений не может быть выполнено в Z-базисе, используемом в блоках измерения состояний кубитов. Проведен анализ точности оценки фаз для различных типов квантовых схем.
Ключевые слова: *кубит, квантовый унитарный оператор, собственное значение оператора, оценка фазы состояния кубита, глубина квантового алгоритма.*

S. G. Fomicheva*
PhD Sc. Tech., Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

QUANTUM PHASE ESTIMATION FOR UNITARY OPERATORS

The results for quantum schemes that allow estimating the eigenvalues value of unitary operators for quantum algorithms are presented. The eigenvalues of unitary operators are used to evaluate the phases of unitary operators, the measurement of which cannot be performed in the Z-basis used in the measurement blocks when performing quantum calculations. The accuracy of the phase estimation for various types of quantum circuits is analyzed.
Keywords: *qubit, quantum unitary operator, operator's eigenvalue, phase estimation of qubit state, quantum algorithm depth.*

Введение

Для разработки эффективных квантовых алгоритмов крайне важно иметь возможность описать последовательное влияние применяемых унитарных операторов на состояние квантовых регистров системы. Сделать это для квантовых систем непросто, поскольку каждое измерение квантовой системы дает не более одного бита информации. Чтобы узнать собственное значение, не говоря уже о квантовом состоянии, нужно соединить результаты многих измерений. Квантовые состояния являются особенно проблемными, так как теорема о запрете клонирования [1] указывает, что не существует способа получить произвольное квантовое состояние из одной фиксированной копии состояния квантовой системы. Поэтому часто при определении квантовых характеристик, операции и состояния рассматриваются в виде «черного ящика», называемых оракулами. Такой подход широко распространен в экспериментальной методике описания характеристик, верификации и валидации (QCVV) [2].

Существующие методы оценки фазы квантового состояния [3]–[7] используют разные стратегии для проектирования экспериментов и различные методы обработки их результатов. Следует отметить, что многочисленные алгоритмы оценки фазы оптимизированы для различных свойств и входных параметров квантовых систем, что приводит к необходимости грамотного выбора, оптимального варианта для конкретной задачи. В частности, некоторые алгоритмы оценки фазы являются адаптивными, то есть будущие шаги классическим образом определяются результатами измерений предыдущих шагов (итеративные алгоритмы). Некоторые требуют возможность потенцирования унитарного оракула типа «черный ящик» с использованием вещественных степеней. Для каких-то нужно много дополнительных кубитов, для других – всего один. Каждый из данных алгоритмов имеет как преимущества (например, возможность оценки фазы с заданной точностью или возможность выполнения на классических компьютерах с ограниченной памятью), так и недостатки. К числу недостатков итеративный методов относят накопление ошибки оценки фазы при увеличении глубины квантовых алгоритмов в силу их вероятностного характера [3].

В этой работе рассмотрен один из алгоритмов устойчивой оценки фазы, среди преимуществ

которых простота квантовой реализации и, как следствие, малая глубина квантового алгоритма. Среди недостатков – необходимость выполнения серии вычислительных экспериментов и выполнения классических тригонометрических функций. Отметим, что оценка фазы часто используется в качестве подпрограммы в других квантовых алгоритмах, таких как алгоритм Шора и квантовый алгоритм для линейных систем уравнений.

Обобщенный унитарный оператор поворота

При выполнении квантового алгоритма меняется квантовое состояние кубита. Квантовое состояние кубита может изменяться во времени двумя принципиально различными путями:

1) применением унитарного квантового оператора;

2) измерением (наблюдением за состоянием кубита).

Принципиальная разница заключается в том, что унитарная операция, по определению [6], является обратимой, а измерение является необратимой операцией. При измерении происходит так называемый коллапс волновой функции, в следствие шумов и эффекта декогеренции квантовый объект «охлопывается» до одного их своих граничных состояний. Именно данный коллапс приводит к невозможности выполнять промежуточные измерения в ходе квантовых вычислений.

Рассмотрим один из унитарных квантовых операторов – обобщенный оператор поворота, который в матричной форме имеет следующий вид:

$$U(\theta,\varphi,\lambda)=\begin{pmatrix} \mathrm{Cos}\left(\frac{\theta}{2}\right) & -e^{i\lambda}\,\mathrm{Sin}\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ e^{-i\varphi}\,\mathrm{Sin}\left(\frac{\theta}{2}\right) & e^{i\lambda-i\varphi}\,\mathrm{Cos}\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где θ,φ,λ углы поворота по соответствующим осям X, Y, Z сферы Блоха (рис. 1).

При $\lambda=\frac{\pi}{2}$ и $\varphi=-\frac{\pi}{2}$ из обобщенного унитарного оператора U в соответствии с выражением (1) может быть получен оператор R_X поворота вокруг оси X:

$$R_X=\begin{pmatrix} \mathrm{Cos}\left(\frac{\theta}{2}\right) & -i\cdot\mathrm{Sin}\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ -i\cdot\mathrm{Sin}\left(\frac{\theta}{2}\right) & \mathrm{Cos}\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

При $\lambda=0$ и $\varphi=0$ из обобщенного унитарного оператора U можно получить оператор R_Y поворота вокруг оси Y

$$R_Y=\begin{pmatrix} \mathrm{Cos}\left(\frac{\theta}{2}\right) & -\mathrm{Sin}\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ \mathrm{Sin}\left(\frac{\theta}{2}\right) & \mathrm{Cos}\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{pmatrix}. \quad (3)$$

При $\lambda=0$ и $\theta=0$ и умножении на глобальную фазу $e^{-i\varphi/2}$ из обобщенного унитарного опе-

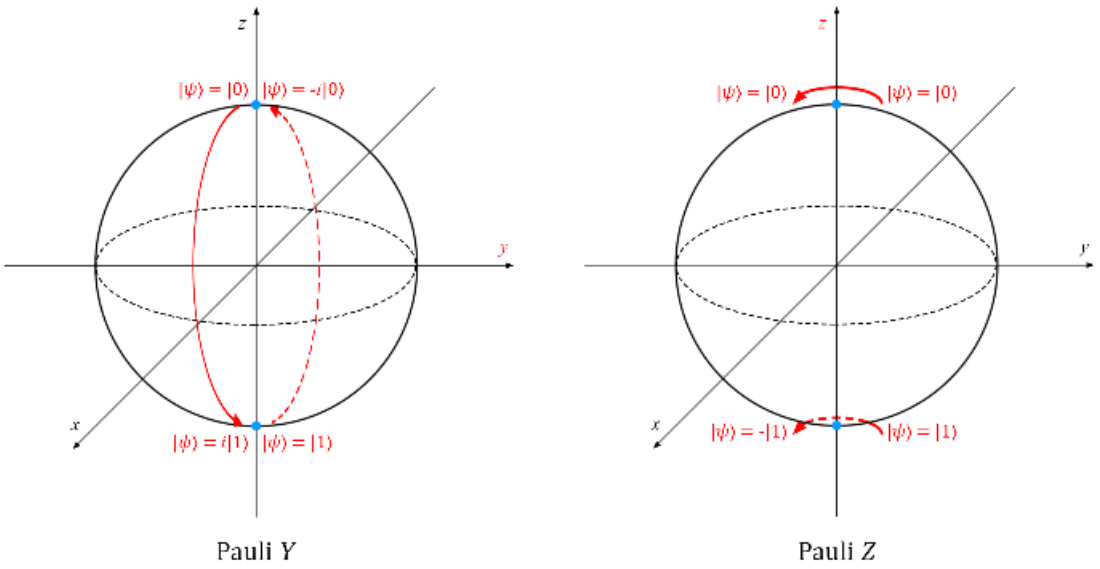


Рис. 1. Сферы Блоха для гейтов поворота

ратора U можно получить оператор R_Z поворота вокруг оси Z:

$$R_Z = \begin{pmatrix} e^{-i\varphi/2} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi/2} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Как упоминалось ранее, квантовая фаза является скрытой для Z-базиса измерений, в связи с чем ее измерение является нетривиальной задачей. Покажем далее, как данная задача может быть решена для гейтов, задаваемых выражениями (1)–(5) с использованием квантовых схем с минимальной глубиной квантовых алгоритмов.

Здесь следует отметить, что квантовые алгоритмы являются вероятностными, следовательно, возникает необходимость проводить эксперименты сериями для каждой квантовой схемы. Кроме того, наличие эффектов декогеренции состояний кубитов и наличие тепловых шумов приводят к погрешностям измерений, в связи с чем на текущий момент увеличение глубины квантовых алгоритмом приводит также к увеличению погрешностей.

Квантовые схемы оценки фазы оператора поворота

Пусть существует неизвестный фазовый вентиль, и требуется определить, как он изменяет фазу базового состояния кубита. Известно [1], что два повторяющихся H-гейта можно использовать, чтобы сначала создать суперпозицию, а затем ее нивелировать. Этот прием можно обобщить с помощью так называемой квантовой схемы Рамсея [5], показанной на рис. 2.

На рис. 2 при выполнении шага A кубит переходит в состояние суперпозиции. Оператор с неизвестным сдвигом фазы применяется на шаге B, создавая состояние

$$|\varphi\rangle_B = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|0\rangle + e^{i\psi}|1\rangle\right). \quad (5)$$

На шаге C второй оператор Адамара (H), пытаясь вернуть кубит в исходное состояние, получает состояние

$$|\varphi\rangle_C = \frac{1}{2}\left[\left(1+e^{i\psi}\right)|0\rangle + \left(1-e^{i\psi}\right)|1\rangle\right] \quad (6)$$

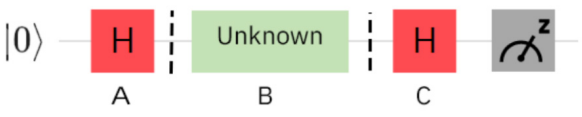


Рис. 2. Квантовая схема Рамсея

которые по правилу Борна [5] будут иметь следующие вероятности:

$$p_0 = \frac{1}{2}\left[(1+\mathrm{Cos}(\psi))\right] \text{ и } p_1 = \frac{1}{2}\left[(1-\mathrm{Cos}(\psi))\right].$$

Разность данных вероятностей можно записать так:

$$d = p_0 - p_1 = \frac{1}{2}\left[(1+\mathrm{Cos}(\psi))\right] - \frac{1}{2}\left[(1-\mathrm{Cos}(\psi))\right] =$$
$$= \frac{1}{2}\mathrm{Cos}(\psi) - \left(-\frac{1}{2}\mathrm{Cos}(\psi)\right) = \mathrm{Cos}(\psi).$$

То есть, используя схему Рамсея (рис. 2) и измерив d, можно определить действительную часть фазового значения:

$$x = \mathrm{Re}\left[e^{i\psi}\right]. \quad (7)$$

Чтобы найти мнимую часть $y = \mathrm{Im}\left[e^{i\psi}\right]$, будем использовать вторую квантовую схему (рис. 3). На ней S^+-гейт сдвигает фазу на $-\frac{\pi}{2}$, в результате можно рассчитать разницу $d_{(1)}$:

$$d_{(1)} = p_0^{(1)} - p_1^{(1)} = \frac{1}{2}\left[\left(1+\mathrm{Cos}\left(\psi-\frac{\pi}{2}\right)\right)\right] -$$
$$-\frac{1}{2}\left[\left(1-\mathrm{Cos}\left(\psi-\frac{\pi}{2}\right)\right)\right] =$$
$$= \frac{1}{2}\mathrm{Sin}(\psi) - \left(-\frac{1}{2}\mathrm{Sin}(\psi)\right) = \mathrm{Sin}(\psi)$$

Теперь, используя тригонометрическую функцию *Arctan2(y, x)*, можно получить искомое значение фазы.

Рассмотрим алгоритм решения данной задачи на конкретном примере.

Алгоритм измерения квантовой фазы

Пусть неизвестный вентиль создает фазовый сдвиг равный $\frac{2\pi}{5}$. Предполагая, что данный сдвиг неизвестен, требуется найти его значение, выполнив эксперимент в IBM Quantom Composer. Приведем пошаговое решение данной задачи.

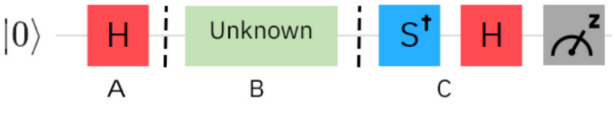


Рис. 3. Квантовая схема для определения мнимой части

Шаг 1. Построим для рассматриваемого оператора квантовую схему Рамсея (рис. 4) и проведем эксперимент, измеряя 4096 раз наблюдаемую величину x на реальной квантовой системе ibmq_manila, предоставляемой в открытом доступе ресурсом [6] и использующей квантовый процессор Falcon r5.11/Version: 1.0.20.

Шаг 2. Построим квантовую схему для измерения мнимой части (рис. 5) и проведем эксперимент, измеряя 4096 раз наблюдаемую величину y на той же квантовой системе.

Шаг 3. Сводим полученные результаты в табл. 1 и определяем разность вероятностей d. Полученные результаты измерений представлены на рис. 6.

Шаг 4. Вычислим

$$\mathrm{tg}(\psi) = \frac{\sin(\psi)}{\cos(\psi)} = \frac{0{,}92138671875}{0{,}333984375} \approx 2{,}7587$$

$$\psi = \mathrm{Arctg}(2{,}7587) = 1{,}223046904$$

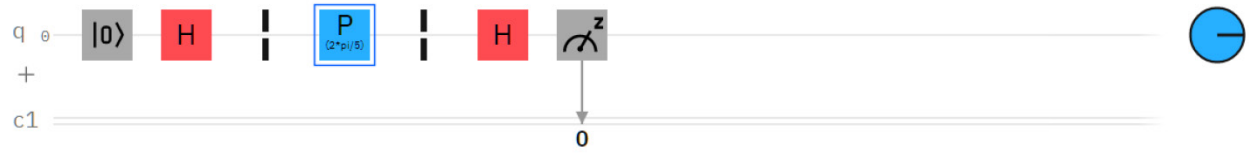


Рис. 4. Квантовая схема Рамсея для $\frac{2\pi}{5}$

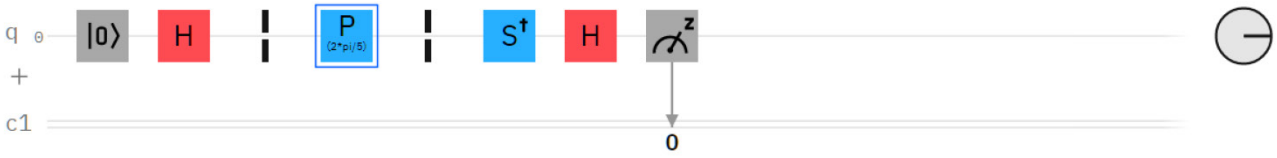


Рис. 5. Квантовая схема для определения мнимой части для $\frac{2\pi}{5}$

Таблица 1

Результаты эксперимента по определению фазы

Наблюдаемая величина	p_0	p_1	d
x	2732/4096=0,6669921875	1364/4096=0,3330078125	0,333984375
y	3935/4096=0,960693359375	161/4096=0,039306640625	0,92138671875

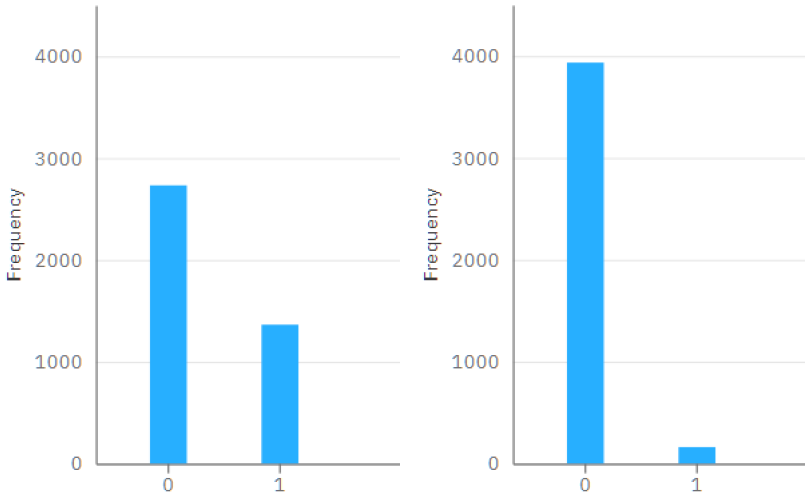


Рис. 6. Результаты измерений, наблюдаемых x (а) и y (б)

Сравним $\frac{2\pi}{5}=1,256$ и $1,223046904$. Абсолютная ошибка, полученная при оценке значения фазы равна $\Delta = 1,256 - 1,223 = 0,033$, что в большинстве случаев вполне приемлемо, учитывая вероятностный характер квантовых вычислений. Для повышения точности следует провести большее количество измерений, например, вместо 4096 экспериментов провести 8192. Другим подходом повышения точности может служить дополнительная нормировка полученных значений x и y.

Предварительная оценка значения фазы может быть уже сделана при использовании только одной из рассматриваемых в этом примере квантовых схем (схемы Рамсея или схемы на рис. 5). При использовании схемы Рамсея, получив ψ, как результат выражения $\arccos(0,333984375)= 1,230268799$, погрешность даже меньше ранее найденной. А результат использования схемы рис. 5 дает оценку для $\psi=\arcsin(0,92138671875)= 1,17163359507$. Здесь важно отметить следующий факт – при увеличении глубины квантовых вычислений растет и их погрешность (в силу эффектов декогеренции и тепловых шумов).

В заключение следует сказать, что существуют квантовые алгоритмы оценки фазы [7], теоретически позволяющий находить ее с заданной точностью в процессе квантовых вычислений. Глубина данного квантового алгоритма существенно больше, чем в рассмотренных выше схемах, что приводит, по крайней мере на сегодняшний день, к измерениям, сопоставимым с полученным в данной работе.

Библиографический список

1. *Холево А. С.* Квантовые системы, каналы, информация. М.: МЦНМО, 2014. 327 с.

2. Better Quantum Living Through QCVV. URL: https://www.microsoft.com/en-us/research/video/better-quantum-living-qcvv/ (дата обращения: 14.12.2021).

3. Описание квантовых характеристик и статистика. URL: https://docs. microsoft.com/ru-ru/azure/quantum/user-guide/libraries/standard/characterization (дата обращения: 14.12.2021).

4. *Kimmel S., Low G., Yoder T.* Robust Calibration of a Universal Single-Qubit Gate-Set via Robust Phase Estimation. URL: https://arxiv.org/pdf/1502.02677.pdf (дата обращения: 14.12.2021).

5. Симуляторы IBM Quantum. IBM Quantum simulators. URL: https://quantum-computing. ibm.com/lab/docs/iql/manage/simulator/ (дата обращения: 24.11.2021).

6. Алгоритм квантовой оценки фазы URL: https://dev. abcdef. wiki/wiki/Quantum_phase_estimation_algorithm (дата обращения: 24.11.2021).

7. *Фомичева С. Г.* Теоретические аспекты квантования баз знаний в мультиагентных системах // Информационно-управляющие системы. 2017. № 3 (88). С. 2–10.

УДК 004. 9.62.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-67-74**

С. Г. Фомичева*
кандидат технических наук, профессор
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

УПРАВЛЯЕМЫЕ КВАНТОВЫЕ СХЕМЫ СВЕРХПЛОТНОГО КОДИРОВАНИЯ

Приведены разновидности квантовых схем, управляемых как кубитами, так и классическими битами в гибридных сетях связи. Выделены функциональные особенности элементов управления, позволяющие манипулировать субъектом квантовых измерений. Представлены результаты выполнения квантовых схем в реальных квантовых системах,
***Ключевые слова**: кубит, сверхплотное кодирование, квантовая телепортация, квантовый канал связи, пропускная способность.*

S. G. Fomicheva*
PhD Sc. Tech., Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

CONTROLLED QUANTUM SUPERDENSE CODING SCHEMES

The varieties of quantum circuits controlled by both qubits and classical bits in hybrid communication networks are given. The functional features of the controls that allow manipulating the subject of quantum measurements are highlighted. The results of the implementation of quantum circuits in real quantum systems are presented.
***Keywords**: qubit, superdense coding, quantum teleportation, quantum communication channel, bandwidth.*

Введение

В настоящее время активно развиваются гибридные коммуникационные сети, включающие в свой состав как классические телекоммуникационные каналы связи, так и квантовые. Квантовый канал связи подразумевает обмен данными с использованием квантовых объектов, подчиняющихся законам квантовой механики [1]. Квантовый объект – объект микромира (фотон, электрон, ион), который проявляет следующие квантовые свойства:

1) имеет определенное состояние с граничными уровнями (кубит имеет два граничных уровня, кутрит, соответственно, три);

2) находится в суперпозиции своего состояния до момента измерения;

3) способен запутываться с другими квантовыми объектами, создавая тем самым квантовые системы;

4) выполняет теорему о запрете клонирования (нельзя скопировать состояние объекта).

Свойства квантовых объектов обуславливают отличительные особенности квантовых систем, к которым следует отнести [2]:

- квантовая система находится в суперпозиции всех возможных состояний объектов, из которых она состоит;
- нельзя узнать состояние системы до момента измерения;
- в момент измерения система реализует один из возможных вариантов своих граничных состояний.

С другой стороны, свойства квантовых объектов неизбежно накладывают дополнительные ограничения на параметры сигналов и передающей среды (ВОЛС – волоконно-оптических линий связи, лазерный атмосферный канал связи, лазерный космический канал связи). В частности, классическое усиление сигнала в квантовом канале невозможно, а предельное расстояние между узлами определяется потерями в канале, так как уровень сигнала на выходе из передатчика не превышает однофотонный [3]. К числу активно исследуемых проблем относят создание дуплексных каналов данных в гибридных сетях, где требуется информационные (классические) сигналы передавать по тому же волокну, по которому передается квантовое состояние объекта. Также открытыми остаются вопросы организации сетевого взаимодействия устройств квантовых коммуникаций различных типов.

Данные причины обуславливают интерес к исследованию протоколов и механизмов управления при совмещенном взаимодействии клас-

сических и квантовых каналов. Ярким примером такого взаимодействия является принцип сверхплотного кодирования (superdense coding), рассматриваемый в данной работе. Акцент сделан на различные варианты управления, позволяющих манипулировать субъектом квантовых измерений. Представлены результаты выполнения квантовых схем как в режимах симуляции, так и в реальных квантовых системах.

Сверхплотное кодирование

Принцип сверхплотного кодирования позволяет кодировать два классических бита одним кубитом, передаваемым от источника (Алисы) получателю (Бобу) за счет использования ранее совместно подготовленной Алисой и Бобом пары запутанных кубитов. Напомним, что в своих граничных состояниях кубит реализует состояния $|0\rangle$ и $|1\rangle$, а в суперпозиции представляет собой вероятностное распределение над своими граничными состояниями $|0\rangle$ и $|1\rangle$: $a|0\rangle+b|1\rangle$ такое, что $a^2+b^2=1$ (где a и b – комплексные числа, являющиеся амплитудами вероятностей получить при измерении 0 и 1 соответственно). Логические квантовые схемы реализуются квантовыми вентилями (гейтами), каждый из которых является унитарным оператором над гильбертовым пространством [1]–[4].

Сверхплотное кодирование превращает ранее запутанные кубиты в ресурс, который можно хранить (как на стороне передатчика, так и на стороне приемника), а затем при необходимости потреблять, удваивая результирующую пропускную способность квантового канала связи. На сегодняшний день в силу эффектов декогеренции время хранения кубита (нахождения кубита в определенном, в том числе запутанном состоянии) ограничена сотнями микросекунд [3], [4], но принципиально наличие возможности использовать ресурс в отложенном периоде важная способность квантовых систем. При этом ресурс можно использовать либо в качестве зафиксированного состояния кубита, либо как «линию» квантового канала связи.

Для выполнения сверхплотного кодирования квантовая схема подразумевает определение:

- способа хранения кубитов;
- канала квантовой связи для передачи кубита;
- возможность выполнять несколько квантовых операций с кубитами.

Типы гейтов, используемых в квантовой схеме сверхплотного кодирования, приведены в табл. 1.

Пусть Алисе требуется передать Бобу информационное сообщение длиной в N-бит, используя квантовый канал связи. Тогда алгоритм сверхплотного кодирования может быть представлен следующими шагами.

Шаг 1. Алиса и Боб заблаговременно подготавливают $N/2$-экземпляров пар кубитов в состоянии Белла (эти экземпляры запутанных кубитов, находящихся в состоянии Белла составляют хранимый ресурс)

$$\left|\varphi^+\right\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|00\rangle+|11\rangle\right)=\frac{|0\rangle\otimes|0\rangle+|1\rangle\otimes|1\rangle}{\sqrt{2}}.$$

Шаг 2. Боб забирает (хранит) по одному кубиту из каждой пары Белла.

Шаг 3. Алиса разбивает свое информационное сообщение последовательно на пары битов ab и кодирует их, используя унитарный оператор U_{ab} в соответствии с табл. 2.

Поскольку Алиса может влиять только на один (свой) кубит из пары Белла, действие на всю пару описывается тензорным произведением. Тогда, учитывая свойства унитарного оператора U_{ab}, имеем:

$$\left(U_{00}\otimes I\right)\left|\varphi^+\right\rangle=(I\otimes I)\frac{|0\rangle\otimes|0\rangle+|1\rangle\otimes|1\rangle}{\sqrt{2}}=$$
$$=\frac{|0\rangle\otimes|0\rangle+|1\rangle\otimes|1\rangle}{\sqrt{2}}=U_{00}$$

Таблица 1

Типы унитарных операторов, используемых при сверхплотном кодировании

Название оператора	Обозначение оператора	Действие оператора	Преобразование	Результат преобразования
X-Gate		NOT (bit-flip)	$\begin{pmatrix}0&1\\1&0\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}a\\b\end{pmatrix}$	$b\|0\rangle+a\|1\rangle$
Z-Gate		Phase-flip	$\begin{pmatrix}1&0\\0&-1\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}a\\b\end{pmatrix}$	$a\|0\rangle-b\|1\rangle$
H-Gate		Hadamard	$\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1&1\\1&-1\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}a\\b\end{pmatrix}$	$\frac{(a+b)\|0\rangle+(a-b)\|1\rangle}{\sqrt{2}}$

$$(U_{01}\otimes I)\left|\varphi^{+}\right\rangle=(U_{01}\otimes I)\frac{|0\rangle\otimes|0\rangle+|1\rangle\otimes|1\rangle}{\sqrt{2}}=$$
$$=\frac{|0\rangle\otimes|0\rangle-|1\rangle\otimes|1\rangle}{\sqrt{2}}=U_{01}$$

$$(U_{10}\otimes I)\left|\varphi^{+}\right\rangle=(U_{10}\otimes I)\frac{|0\rangle\otimes|0\rangle+|1\rangle\otimes|1\rangle}{\sqrt{2}}=$$
$$=\frac{|1\rangle\otimes|0\rangle+|0\rangle\otimes|1\rangle}{\sqrt{2}}=U_{10}$$

$$(U_{11}\otimes I)\left|\varphi^{+}\right\rangle=(U_{11}\otimes I)\frac{|0\rangle\otimes|0\rangle+|1\rangle\otimes|1\rangle}{\sqrt{2}}=$$
$$=\frac{-|1\rangle\otimes|0\rangle+|0\rangle\otimes|1\rangle}{\sqrt{2}}=U_{11}$$

То есть $(U_{ab}\otimes I)\left|\varphi^{+}\right\rangle=U_{ab}$.

Шаг 4. После кодирования Алиса пересылает свой преобразованный из пары Белла кубит Бобу. В результате Боб получает оба кубита из пары Белла, один из которых преобразован Алисой.

Шаг 5. Боб выполняет операцию декодирования. Поскольку для получения пары Белла используются преобразования $(I\otimes H)CNOT|ab\rangle$, то для декодирования Бобу достаточно выполнить преобразование

$$|ab\rangle=|a\rangle\otimes|b\rangle=\left((I\otimes H)\cdot CNOT\right)^{-1}\left|\varphi^{ab}\right\rangle.$$

Выполнив преобразования

$$\left((I\otimes H)\cdot CNOT\right)^{-1}=\left((I\otimes H)\cdot CNOT\right)^{+}=$$
$$=(I\otimes H)^{+}\cdot CNOT^{+}=(I\otimes H)\cdot CNOT,$$

получаем схему декодирования, зеркальную схеме кодирования. Квантовые схемы без управления гейтами преобразований представлены в табл. 3. На схемах младший кубит расположен сверху, а в информационном сообщении и квантовом состоянии – справа. Боб производит измерения в базисе Белла.

Управление информационным сообщением в квантовых схемах сверхплотного кодирования

Перед рассмотрением вопросов управления сверхплотным кодированием, следует отменить, что необходимое количество пар Белла может формироваться разными участниками сетевого взаимодействия. Это может сделать как Алиса, так и Боб. Кроме того, подготовить необходимые экземпляры пар Белла может третья сторона. Важно лишь то, что пары Белла должны быть доставлены участникам коммуникации заранее и сохраниться для дальнейшего использования. Поскольку, по сути, один из кубитов, который используется на принимающей стороне для восстановления фактического (передаваемого Алисой) сообщения, может быть отправлен заранее, то нагрузка на трафик может контролироваться. В частности, в периоды низкой загрузки квантовый канал связи можно использовать для передачи предподготовленных для совместного использования пар Белла (накапливая ресурс) и увеличивать пропускную способность канала с помощью пар Белла в период высокой загрузки, что позволяет сгладить пики трафика канала связи в целом.

При передаче информационного сообщения структура квантовой схемы при сверхплотном кодировании, как было показано в разделе 1, должна быть управляемой. Как правило, необходимость передать классическое (битовое) информационное сообщение возникает, если требуется передать результаты измерения определенных кубитов в процессе выполнения кванто-

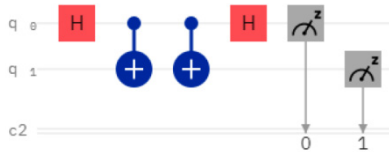
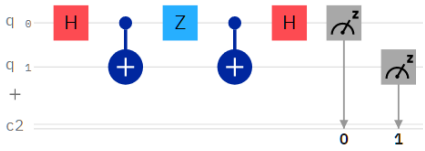
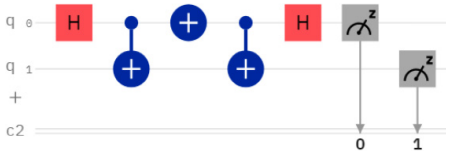
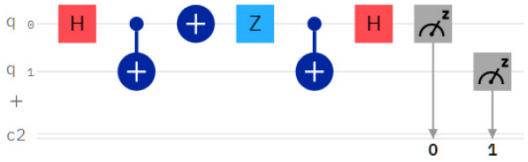
Таблица 2

Унитарные операторы сверхплотного кодирования

ab	U_{ab}	*gates*	Матрица оператора U_{ab}	Свойства оператора U_{ab}
00	U_{00}	I	$\begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{pmatrix}$	$U_{00}\|0\rangle=\|0\rangle, U_{00}\|1\rangle=\|1\rangle$
01	U_{01}	Z	$\begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & -1\end{pmatrix}$	$U_{01}\|0\rangle=\|0\rangle, U_{01}\|1\rangle=-\|1\rangle$
10	U_{10}	X	$\begin{pmatrix}0 & 1\\ 1 & 0\end{pmatrix}$	$U_{10}\|0\rangle=\|1\rangle, U_{10}\|1\rangle=\|0\rangle$
11	U_{11}	XZ	$\begin{pmatrix}0 & 1\\ -1 & 0\end{pmatrix}$	$U_{11}\|0\rangle=-\|1\rangle, U_{11}\|1\rangle=\|0\rangle$

Таблица 3

Квантовые схемы сверхплотного кодирования без управления

ab	Квантовая схема сверхплотного кодирования	Вероятность (%) правильного декодирования при симуляции IBM Quantum Simulator	Вероятность (%) правильного декодирования на Falcon r5.11/ Version: 1.0.20
00		100	98,91
01		100	92,18
10		100	94,72
11		100	94,04

вого алгоритма. Поэтому приведем далее соответствующую схему, предусматривающую подобного рода управление (рис. 1).

На рис. 1 кубиты с номерами q_0 и q_1 являются управляющими, гейты управления размещены между барьерами, выделенными на схеме пунктирными линиями. После измерения q_0 и q_1 Алиса в данном случае получает информационное сообщение *ab*=(10), которое успешно транслируется на сторону Боба и декодируется, что подтверждается измерением вероятностей состояний при симуляции IBM Quantum Simulator [5] всей квантовой системы на рис. 2.

Результаты, получаемые при реализации схем на реальном квантовом оборудовании, в силу наличия шумов и вероятностной парадигмы квантовых вычислений часто отличаются от результатов симуляции. Реализуем разработанную 4-кубитную схему на реальной квантовой системе ibmq_manila, предоставляемой в открытом доступе ресурсом [5] и использующей квантовый процессор Falcon r5.11/Version: 1.0.20. Пусть теперь Алисе требуется передать информационное сообщение *ab*=(01). Количество запусков установлено равным 1024. Время выполнения данной схемы (Running) составило: 10.9 с, время выполнения квантовой части (time in system) 5.7 с. Результаты реализации управляемой схемы сверхплотного кодирования представлены на рис. 3.

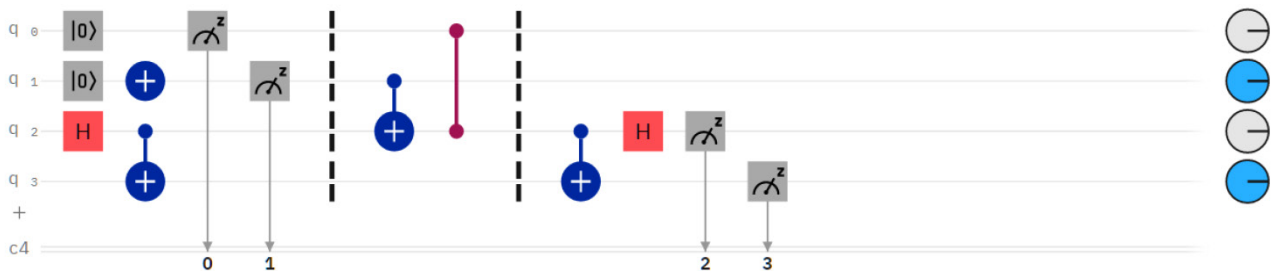


Рис. 1. Сверхплотное кодирование с управлением битами информационного сообщения

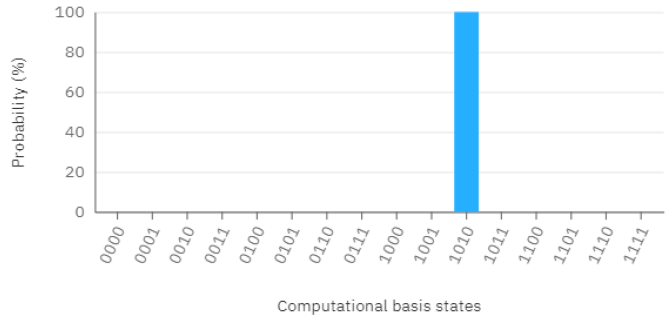


Рис. 2. Диаграмма состояний IBMQuantum Simulatjr квантовой системы сверхплотного кодирования при передаче сообщения (10) – младший бит слева

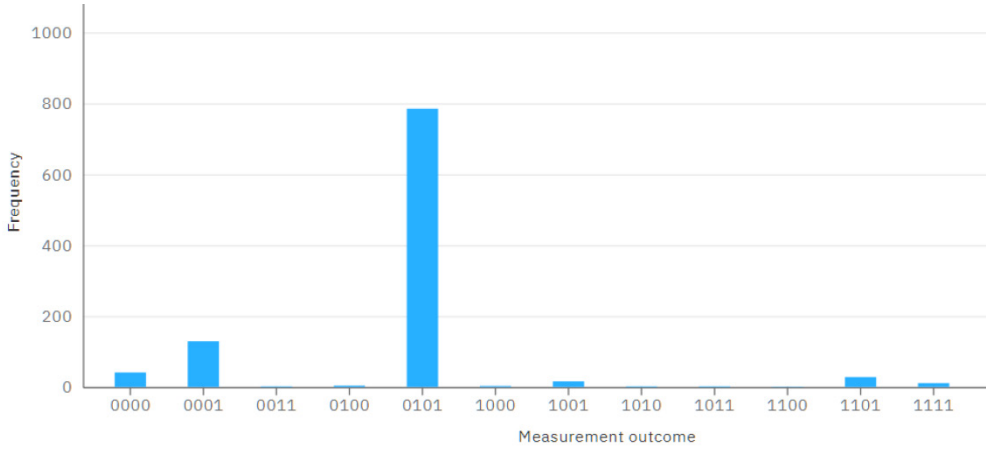


Рис. 3. Диаграмма результирующих измерений квантовой системы сверхплотного кодирования при передаче сообщения (01) – ibmq_manila/ Falcon r5.11/Version: 1.0.20

На гистограмме (рис. 3) правильными исходами являются все состояния квантовой системы, при которых кубиты q_2 и q_3 (Боба) при измерении приняли значения q_2=1 и q_3=0. Таких исходов 785 (0101)+4 (0100)=789, что составляет (789*100)/1024=77,05 %, хотя на этапе симуляции доля привольных исходов равнялась 100 %.

Вероятности правильного декодирования всех вариантов, передаваемых Алисов информационных сообщений как в режиме симуляции, так и при реализации на реальных квантовых системах, приведены в табл. 4.

Погрешности измерений весьма существенны, что накладывает необходимость при передаче информации по квантовым каналам использовать механизмы коррекции ошибок [6], [7], которые, как правило, предполагают передачу корректирующих сигналов по классических каналам связи.

Таблица 4

Результаты реализации управляемой квантовой схемы сверхплотного кодирования

Информационное сообщение	Количество запусков	Вероятность (%) правильного декодирования при симуляции	Вероятность (%) правильного декодирования на Falcon r5.11/Version: 1.0.20
00	1024	100	76,86
01	1024	100	77,05
10	1024	100	53,51
11	1024	100	48,73

Управление посылкой кубита в квантовых схемах сверхплотного кодирования

Выделим явно процесс передачи Бобу запутанного и преобразованного Алисов кубита. Для этого сконструируем схему таким образом, что кубиты q_0, q_1 и q_2 принадлежат Алисе, а кубиты q_3 и q_4 – Бобу. Используем SWAP-гейт для обмена состояниями кубитов q_2 и q_3, выполнив тем самым передачу второй (преобразованной Алисой) половины пары Белла Бобу.

Пусть Алисе требуется передать информационное сообщение *ab=(01)*. В результате получаем завершенную управляемую схему сверхплотного кодирования (рис. 4). Реализуем разработанную 5-кубитную схему на той же реальной квантовой системе ibmq_manila с квантовым процессором Falcon r5.11/Version: 1.0.20. Количество запусков установлено равным 1024. Время выполнения данной схемы (Running) составило: 15.3 с, время выполнения квантовой части (time in system) 5.3 с. Результаты реализации управляемой схемы сверхплотного кодирования представлены на рис. 5.

На гистограмме (рис. 5) правильными исходами являются все состояния квантовой системы, при которых кубиты q_3 и q_4 (Боба) при измерении приняли значения q_3=0 и q_4=1. Таких исходов 548 (01001)+21 (01000)+4 (01011)=573, что составляет (573*100)/1024=55,95 %.

Аналогичные погрешности вычислений проявляются при передаче информационного сообщения *ab*=(11). На гистограмме (рис. 6) правильными исходами являются все состояния квантовой системы, при которых кубиты q_3 и q_4 (Боба) при измерении приняли значения q_3=1 и q_4=1. Таких исходов 396 (11011)+9 (11010)+4 (11001)=409, что составляет (409*100)/1024=40 %.

Вероятности правильного декодирования всех вариантов, передаваемых Алисов информационных сообщений при управлении посылкой кубита, приведены в табл. 5.

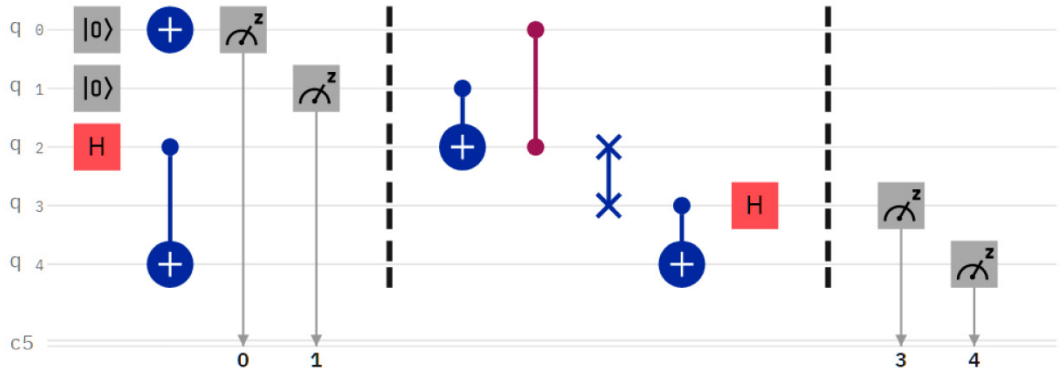


Рис. 4. Сверхплотное кодирование с управлением посылкой кубита

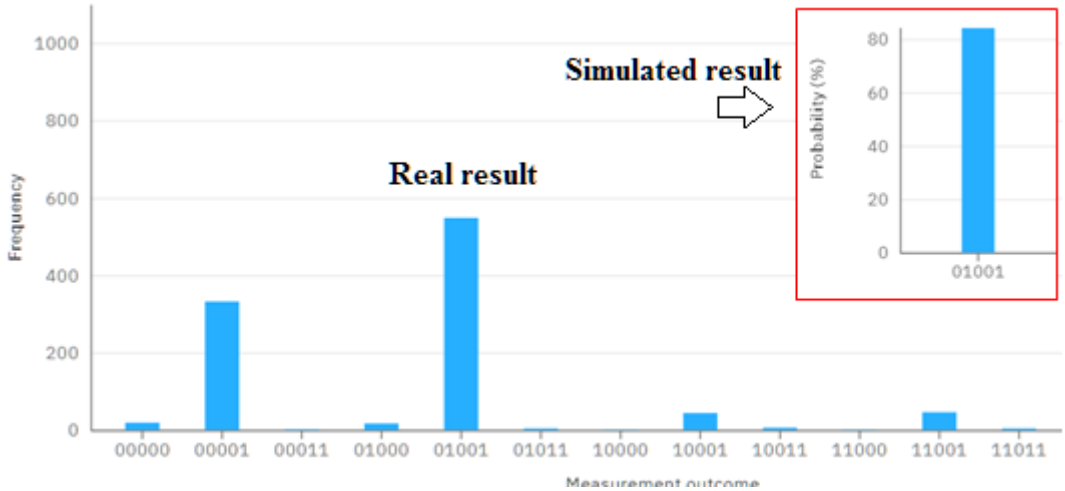


Рис. 5. Диаграмма результирующих измерений квантовой системы сверхплотного кодирования при передаче сообщения (01) – ibmq_manila/ Falcon r5.11/Version: 1.0.20

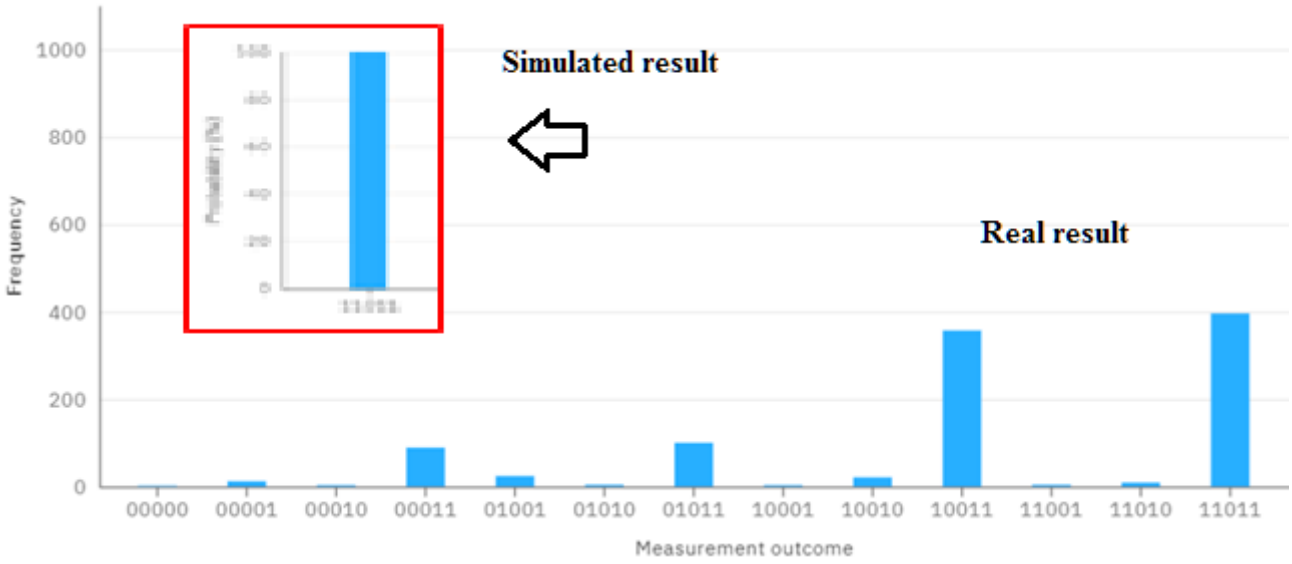


Рис. 6. Диаграмма результирующих измерений квантовой системы сверхплотного кодирования при передаче сообщения (11) – ibmq_manila/ Falcon r5.11/Version: 1.0.20

Таблица 5

Результаты реализации квантовой схемы сверхплотного кодирования при управлении посылкой кубита

Информационное сообщение	Количество запусков	Вероятность (%) правильного декодирования при симуляции	Вероятность (%) правильного декодирования на Falcon r5.11/Version: 1.0.20
00	1024	100	76,56
01	1024	100	55,95
10	1024	100	69,72
11	1024	100	40

Заключение

Квантовые вычислительные процессы, являясь вероятностными, принципиально отличаются от традиционных логических битовых операций. К принципиально отличным квантовым парадигмам относятся сверхплотное кодирование и квантовая телепортация. По сути, сверхплотное кодирование является альтернативой квантовой телепортации. При квантовой телепортации каждый телепортируемый по квантовому каналу кубит сопровождается посылкой двух контролирующих бит по классическому каналу связи. Сверхплотное кодирование подразумевает, что доставляемый от Алисы Бобу кубит из пары Белла содержит всю необходимую информацию для его правильного декодирования.

Как показывают проведенные в данной работе исследования, процессы сверхплотного кодирования могут быть управляемыми, в полной мере демонстрируя это при симуляции квантовых вычислений. Однако существующие на данный момент реальные квантовые системы весьма чувствительны к таким эффектам, как декогеренция, что проявляется при увеличении глубины квантовых вычислений и приводит на практике к существенным измерительным погрешностям. Это требует при передаче информации по квантовым и гибридным каналам связи использовать механизмы коррекции ошибок, что в свою очередь приводит к снижению пропускной способности в целом.

Библиографический список

1. *Холево А. С.* Квантовые системы, каналы, информация. М.: МЦНМО, 2014 327 с.

2. *Nielsen M., Isaac L.* (9 December 2010). Application: superdense coding. Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition. Cambridge University Press. P. 97.

3. *Козубов А. В., Гайдаш А. А., Кынев С. М.* Основы квантовой коммуникации. Ч. 1. СПб.: ИТМО, 2019. 85 с.

4. *Fomicheva S.* Soft quantization of the production's knowledgebases for multi-agent systems // Conference of Open Innovation Association, FRUCT. Proceedings of the 20th Conference of Open Innovations Association. 2017. P. 69–76.

5. Симуляторы IBM Quantum. IBM Quantum simulators. URL: https://quantum-computing. ibm.com/lab/docs/iql/manage/simulator/ (дата обращения: 24.11.2021).

6. Performance and structure of single-mode bosonic codes. Physical Review A. 97 (3): 032346. ArXiv:1708.05010. Bibcode: 2018. PhRvA. 97c2346A.

7. *Фомичева С. Г.* Теоретические аспекты квантования баз знаний в мультиагентных системах // Информационно-управляющие системы. 2017. № 3 (88). С. 2–10.

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 004.021

В. Г. Буласова*
магистрант
Г. Ю. Беспятый*
магистрант
В. Е. Белай*
ассистент, аспирант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОБЗОР АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Планирование пути мобильного робота в неизвестной среде – фундаментальная и сложная проблема в области робототехники. Были предложены методы, основанные на различных идеалах и описаниях карт, такие как метод на основе сетки, планирование на основе выборки (SBP), интеллектуальный алгоритм, DWA, RL и т. д. Подход с динамическим окном (DWA) является эффективным методом планирования пути на небольшом участке, однако некоторые из его оценочных функций нелогичны, а алгоритм выбора весов этих функций отсутствует, что делает его сильно зависимым к точкам/маякам и подверженным ошибкам.
В этой статье предлагается улучшенный DWA на основе Q-обучения. Во-первых, исходные функции оценки изменяются и расширяются за счет добавления двух новых функций оценки для повышения производительности глобальной навигации. Затем, учитывая баланс эффективности и скорости, мы определяем пространство состояний, пространство действий и функцию вознаграждения принятого алгоритма Q-обучения для планирования движения робота. После этого параметры предложенного DWA адаптивно изучаются с помощью Q-обучения, и получается обученный робот для адаптации к неизвестной среде. Во-вторых, с помощью серии сравнительных симуляций, предложенный метод показывает более высокую эффективность навигации и отличную скорость в сложной неизвестной среде.
Ключевые слова: *робот-навигация, планирование пути, DWA, Q-обучение, функция оценки.*

V. G. Bulasova*
Student
G. U. Bespyaty*
Student
V. E. Belay*
Assistant, Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

REVIEW OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS FOR POSITIONING A MOBILE ROBOTICS SYSTEM

In the areas of industrial and agricultural production, intelligent logistics, space exploration and emergency relief, the use of mobile robots has become more common. Robots can carry a variety of tools, such as rangefinders, fire extinguishers, to perform various tasks. The rationale for completing the task is that the robot can move autonomously and adaptively.
Planning the path of a mobile robot in an unknown environment is a fundamental and complex problem in the field of robotics. Path planning technology has been studied by many scientists over the past few decades. Methods based on different ideals and map descriptions have been proposed, such as potential field method (PFM), grid-based method, sample-based planning (SBP), smart algorithm, DWA, RL, etc. Dynamic Window Approach (DWA) is an effective method for planning a path over a small section, however, some of its estimation functions are illogical and there is no algorithm for choosing the weights of these functions, making it highly point / beacon dependent and error prone.
This article suggests an improved DWA based on Q-training. First, the original scoring functions are being modified and expanded with the addition of two new scoring functions to improve global navigation performance. Then, considering the balance of efficiency and speed, we define the state space, action space and reward function of the adopted Q-learning algorithm for planning the robot's motion.
After that, the parameters of the proposed DWA are adaptively learned using Q-learning, and a trained robot is obtained to adapt to an unknown environment. Finally, through a series of comparison simulations, the proposed method shows better navigation efficiency and excellent speed in a complex unknown environment.
Keywords: *robot navigation, path planning, DWA, Q-training, evaluation function.*

Планирование пути – одна из ключевых технологий мобильных роботов, которая описывается как поиск пути без столкновений, соединяющий начальную точку и цель в рабочей среде. Может быть выбран такой индикатор оптимизации пути, как кратчайшая длина, минимальное время в пути, минимальная вероятность столкновения, прохождение через определенные места и т. д.

В зависимости от уровня осведомленности об окружающей среде и объема планирования алгоритмы планирования пути можно разделить на: 1) глобальное планирование пути, при котором робот находит свободный от столкновений путь, соединяющий начальную точку с целью в рамках известной глобальной карты окружающей среды, которая обычно выполняется один раз и получает эталонный глобальный путь; 2) локальное планирование пути, когда робот перемещается в соответствии с информацией в реальном времени, полученной датчиками дальности, такими как лидар RoboPeak RpLiadar A1, Ping датчик, Ультразвуковой дальномер HC-SR04, камера e-CAM50_CUNANO – 5.0 MP. Основная задача, которую должен решать робот, это изучение лабиринта и поиск оптимального прохождение. Эта задача абстрактна от реальных, но ее решение поможет решить более сложные задачи: перемещение робота на складе, выполнение роботом пожарных работ и т. п. [1].

В последние годы методы машинного обучения (ML) широко используются в автономных роботах, которые наделены способностью к адаптивному обучению на основе накопленных знаний. Обучение с подкреплением (Reinforcement learning, RL) – это важная ветвь машинного обучения, которая непрерывно обновляет политику действий робота в соответствии с обратной связью из среды методом проб и ошибок.

Сосредоточившись на алгоритме планирования локального пути, был выбран подход с динамическим окном (DWA) для расширения возможностей глобальной навигации, основанный на *Q*-обучении, для изучения оптимальной адаптации параметров в DWA. Алгоритм *Q*-обучения – один из алгоритмов RL, который имеет множество функций, делающих его подходящим для планирования пути роботов.

Во-первых, алгоритм *Q*-обучения не требует никакой предварительной информации об окружающей среде, но накапливает информацию посредством взаимодействия с ней.

Во-вторых, в качестве автономного метода алгоритм *Q*-обучения позволяет повторно использовать прошлый опыт для обучения в реальном времени, и нет необходимости предпринимать действия по обновлению *Q*-таблицы. Этот метод обучения может эффективно сэкономить затраты на обучение и повысить эффективность обучения мобильных роботов.

В-третьих, обучающие данные *Q*-обучения немаркированы, и на каждое действие получает мгновенную информацию от среды.

Для выбора подходящего алгоритма мы опирались на несколько условий. Робот недолжен иметь данных о глобальной карте, он самостоятельно строит локальную карту в реальном времени. Робот должен самообучаться, опираясь на построенную карту, а именно решать задачу нахождения оптимального пути. Самообучения происходит без вмешательства оператора или любых других внешних факторов [2].

Метод на основе сеток – это классический алгоритм глобального планирования пути, который делит карту на двумерные сетки. Направлениями улучшения этого метода являются ускорение вычислений, увеличение направления поиска для сокращения пути или обеспечение безопасности и осуществимости траектории [3]. Результатом метода на основе сеток является контрольный путь, который по-прежнему остается алгоритмом отслеживания пути для управления движением робота.

Планирование на основе выборки (SBP) уникально тем, что происходит путем выборки из конфигурационного пространства (C-пространство). Основной алгоритм SBP включает в себя вероятностный метод дорожной карты (PRM), рандомизированный потенциальный планировщик (RPP), быстро исследующие случайные деревья (RRT), дерево исследования/использования (EET), обширные пространственные деревья (EST) и т. п. Несмотря на то, что были достигнуты некоторые успехи в устранении неопределенности или кинодинамики в активной среде, все еще есть много возможностей для улучшения алгоритма SBP среди движущихся неконтролируемых препятствий и в условиях – тиковые динамические и чувствительные условия [4].

На основе алгоритма кривизны скорости (CVM) был предложен более полный подход с динамическим окном (DWA), который учитывал физические ограничения робота, ограничения окружающей среды и текущую скорость. В соответствии с информацией о положении датчика и робота функции оценки часто учитывают три фактора: скорость, угол маршрута и расстояние до препятствия. Этот метод позволяет напрямую получить желаемую линейную и угловую скорость с учетом кинематической модели робота, что делает траекторию более плавной и подходящей для движения робота.

Чтобы улучшить уязвимые характеристики DWA, сталкивающиеся с ситуациями ловушки, был предложен подход глобального динамического окна (GDWA) со скалярной функцией, представляющей расстояние от целевой точки. Представлен энергоэффективный локальный планировщик путей в динамических средах, который расширил DWA, включив функцию затрат, основанную на потреблении энергии, прогнозируемом с помощью модели линейной регрессии (LR) [5]. Для улучшения восприятия навигации роботов и адаптации траектории для имитации поведения человека был предложен биомиметический DWA (BDWA), функция вознаграждения которого была извлечена из реальных следов различных двигательных нарушений, перемещающихся в условиях больницы.

Однако существующий DWA по-прежнему неидеален в двух аспектах. Во-первых, механизм существующей функции оценки не является достаточно разумным. Количество оценочных функций нелогично, когда робот находится очень близко к целевой точке или сталкивается со спиральным распределением препятствий. Во-вторых, в процессе планирования пути степень спроса на каждую функцию оценки зависит от времени, которое изменяется в зависимости от позиционного отношения между роботом, препятствием и целью. Робот не может решить, какую функцию оценки следует принимать во внимание при различных обстоятельствах [6].

Эти два аспекта могут не удовлетворять условия. Например, скорость робота слишком мала, когда он находится рядом с целью, или робот слишком близко к препятствию при его уклонении. Когда препятствие находится в спиральном распределении, робот может оказаться внутри него и не сможет выбраться из него. Столкнувшись с плотными препятствиями, не выбирать более короткий путь между ними, а обходить эти области, что увеличивает общий путь.

Для первого аспекта было предложено GDWA: устранить ранее упомянутую проблему локальных минимумов путем определения функции навигации (NF). Что касается второго аспекта, версия GDWA изменила функцию оценки на невзвешенную функцию [7]. Эта функция учитывает только положение робота и значение NF, поэтому он содержит только один элемент.

В предлагаемом подходе планирование пути робота было решено с помощью Q-обучения. Он основан на модели, значение Q которого было аппроксимировано нейронной сетью, названной глубоким Q-обучением, а вознаграждение рассчитывалось на основе карты сетки. Функция вознаграждения на основе журнала была введена в глубокое Q-обучение, чтобы увеличить вероятность успешного обхода препятствий для колесного мобильного робота. Для предотвращения попадания в ловушку локального оптимума, Q-обучение может значительно повысить эффективность системы с несколькими роботами, уменьшая количество исследований и сближая процесс.

Положение робота учитывается относительно препятствия или цели, но игнорируется ориентация и скорость, которые могут не полностью описывать состояние робота. Также робот выполняет относительно простые действия: поворот вправо или влево, перемещение на один шаг в нескольких направлениях (особенно в сеточной карте). Эти грубые действия, как правило, делают путь слишком непоследовательным, чтобы его можно было отследить, и некоторые лучшие пути игнорируются. Напротив, Q-обучение, применяемое в предлагаемом нами методе, предназначено для повышения производительности DWA, что сохраняет преимущество осуществимого и превосходного пути DWA [8].

Как классический алгоритм планирования локального пути, DWA имеет ограниченные возможности глобального поиска и полагается на опорный путь, что затрудняет навигацию робота, когда глобальная среда неизвестна. Рассмотрены несколько алгоритмов планирования пути мобильного робота, проанализированы их достоинства и недостатки. Мы остановились на DWA с Q-обучением и RL, предложив решение для достижения максимальной эффективности и точности работы. На основе анализа мы провели эксперименты над мобильной робототехнической системой, применив алгоритм адаптивной настройки параметров DWA на основе обучения с подкреплением RL и Q-обучением.

Библиографический список

1. *Azzabi A., Nouri K.* Design of a robust tracking controller for a nonholonomic mobile robot based on sliding mode with adaptive gain // International journal of advanced robotic systems. 2021. N 1.

2. *Колесников И. В., Белай В. Е., Солёный С. В.* Агропромышленные робототехнические комплексы и системы // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых. 2021. С. 340–345.

3. *Баллестерос Д., Урдиалес К., Веласко А.* Биомиметический динамический оконный подход к навигации для совместного управления // IEEE Transactions по человеко-машинным системам. 2017. 47 (6). С. 1123–1133.

4. *Чанг Л., Шань Л., Ли Д.* Планирование пути мобильных роботов на основе улучшенного алгорит-

ма // 16-я Международ. IEEE конф. по сетям, зондированию и контролю (ICNSC). 2019. С. 257–262.

5. *Камынин К. В., Солёная О. Я., Белай В. Е.* Решение задач с применением нейронных сетей в различных типах производств // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых. 2020. С. 90–94.

6. *Белай В. Е., Глушкова Е. И.* Автоматизация складов в агропромышленной отрасли // Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации. 2021. С. 58–64.

7. *Гонсалес Р., Джаякумар П., Ягнемма К.* Стохастическое предсказание подвижности наземных транспортных средств в больших пространственных регионах: геостатистический подход // Автономные роботы. 2017. 41 (2). С. 311–331.

8. *Ефремов К. С., Ворожцова Н. А.* Применение оптимальных траекторий для управления колесным мобильным роботом при помощи искусственной нейронной сети // Новые кадры оборонно-промышленного комплекса: Диверсификация ОПК и реализация национальных проектов. 2019. С. 47–52.

УДК 519.687.1 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-79-83**

А. Е. Городецкий*
доктор технических наук, профессор
В. Г. Курбанов*,*
кандидат физико-математических наук, доцент
И. Л. Тарасова*
кандитдат технических наук, старший научный сотрудник
**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук*
***Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ БПЛА

Рассмотрено решение проблемы распознавания объектов в окружение выбора БПЛА по результатам компьютерного моделирования. Предложены алгоритмы компьютерного моделирования работы центральной нервной системы БПЛА и вычисляемые по результатам моделирования интегральную оценку эффективности алгоритмов. Использование тестового моделирования позволяет путем машинных экспериментов отбирать БПЛА с учетом эффективности выполнения задач идентификации окружения выбора с учетом минимизации коллизий, приводящих к аварийным ситуациям.
Ключевые слова: *распознавание целей, интегральная эффективность, алгоритм классификации, БПЛА, окружение выбора.*

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*

COMPUTER SIMULATION OF UAV OBJECT RECOGNITIONS

Solving the problem of object recognition in the environment of UAV selection based on the results of computer simulation. Algorithms for computer modeling of the operation of the central nervous system of UAVs and an integrated assessment of the effectiveness of the algorithms calculated from the results of modeling are proposed. The use of test modeling makes it possible to select UAVs through machine experiments, taking into account the effectiveness of the tasks of identifying the selection environment, taking into account the minimization of collisions leading to emergency situations.
Keywords: *target recognition, integral efficiency, classification algorithm, UAV, choice environment.*

Введение

Для правильного принятия решения при ситуационном управлении мобильных роботов [1], [2], [3], [4], в том числе и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [5]–[8], особенно важно повышение точности и скорости классификации объектов в окружении выбора. Это в многом определяет качество ситуационного управления без аварийных ситуаций при выполнении поставленных задач обнаружения целей, их идентификации (классификации) и других необходимых операций [9]–[12]. Наиболее сложной из них и в наибольшей степени влияющей на достижение цели, является задача обнаружение и классификация целей.

В алгоритмах классификации среди множества изображений G выделяется множество изображений g_{O1}, относящихся к классу o_1 и присваивается им имя этого класса. Затем среди множества O^1=O\g_{O1} выделяется множество объектов g_{O2}, относящихся к классу O_2, затем среди множества оставшихся изображений O^2=O^1\ g_{O2} выделяется множество изображений g_{O3}, относящиеся к классу O_3 и присвоим им имя этого класса. Далее будем продолжать процесс подобного отбора до тех пор, пока не будут исчерпаны все изображения из базы данных, то есть ((((O\ g_{O1})\

g_{O2})...) g_{Ok})=O^k. Если будет так, что все изображения и все эталонные образы базы данных исчерпаны, но останутся не проклассифицированные изображения, то есть $O^k \neq \varnothing$., то этим изображениям присваивается имя нового класса k+1 и они временно заносятся в базу данных с этим именем. Таких изображений может быть очень много. В этом случае может быть поставлена задача разбиения k+1 класса на новые эталонные образы и соответственно, отнесение этих изображений к вновь введенным эталонам.

Одной из проблем обеспечения требуемой точности алгоритмов классификации являются сложности, возникающие при обработке неполной и противоречивой информации, которая не была или не могла быть учтена при формировании обучающей выборки.

Для преодоления этих трудностей развиваются так называемые структурно-лингвистические методы распознавания. Например, в [13] и [14] предлагаются алгоритмы логико-лингвистической классификации (ЛЛК), которые позволяют достигать высокую скорость классификации при точности классификации порядка 80 % и уровне шума до 50 %.

Компьютерное моделирование принятия решений группой БПЛА

Получение при использовании алгоритмов ЛЛК высокой скорости классификации без ухудшения точности за счет вычисления минимальной суммы разностей значений функций принадлежности элементов строк атрибутов эталонов и классифицируемых изображений особенно важно для систем управления БПЛА при их групповом взаимодействии.

При моделировании оценивалась эффективность классификации с фильтрацией помех следующих k=5 усложняющихся задачах.

При предварительной фильтрации помех до величины максимум в:

– 10 % от полезного сигнала,
– 20 % от полезного сигнала,
– 30 % от полезного сигнала,
– 40 % от полезного сигнала,
– 50 % от полезного сигнала.

Производилась оценка эффективности следующие алгоритмы классификации целей в окружении выбора.

Алгоритм логико-лингвистической классификации ЛЛК1, в котором решающее правило классификации строится на вычисления минимальной суммы квадратов разностей значений функций принадлежности элементов строк атрибутов эталонов и классифицируемых изображений.

Алгоритм логико-лингвистической классификации ЛЛК2, отличающийся от алгоритма ЛЛК1 тем, что в нем решающее правило классификации строится на вычисления минимальной суммы квадратов разностей значений функций принадлежности, умноженных на коэффициенты значимости элементов строк атрибутов эталонов и классифицируемых изображений.

Алгоритм логико-лингвистической классификации ЛЛК3, отличающийся от алгоритма ЛЛК1 тем, что в нем классификация производится поэтапно по отдельным группам эталонов, а не по всей их совокупности.

Алгоритм логико-лингвистической классификации ЛЛК4, отличающийся от алгоритма ЛЛК3 тем, что в нем классификация производится с учетом коэффициентов значимости групп эталонов.

При тестировании рассматривались следующие группы объектов: s_1 – наземная техника; s_2 – плавсредства; s_3 – летательные аппараты; s_4 – люди. При этом все образы объектов характеризовались набором видов атрибутов и значениями их функций принадлежности, назначаемыми группой экспертов. Каждое изображений объектов тестировалось 100 раз.

Значения атрибутов и их коэффициенты значимости предлагается экспертами.

В результате тестовых испытаний были получены следующие значения интегральных оценок их эффективности по формуле

$$I = \int_0^2 f(x)dx,$$

где: $f(x)$ – функция точности; x – помеха ($0 \le x \le 2$). Для ЛЛК1: минимальная эффективность $I_{1\min}$=0,3244, максимальная $I_{1\max}$=1,0608, средняя $I_{1\mathrm{mid}}$=0,5583 (рис. 1).

Для ЛЛК2: минимальная эффективность $I_{2\min}$=0,3000, максимальная $I_{2\max}$=0,9356, средняя $I_{2\mathrm{mid}}$=0,6071 (рис. 2).

Для ЛЛК3: минимальная эффективность $I_{3\min}$=0,3312, максимальная $I_{3\max}$=0,8884, средняя $I_{3\mathrm{mid}}$=0,6473 (рис. 3).

Для ЛЛК4: минимальная эффективность $I_{4\min}$=0,2980, максимальная $I_{4\max}$=1,3308, средняя $I_{4\mathrm{mid}}$=0,7387 (рис. 4).

Кроме того, для алгоритмов ЛЛК3 и ЛЛК4 были получены эффективности классификации по группам.

Для ЛЛК3:

– по группе объектов s_1: минимальное $I_{31\min}$=0,3312; максимальное. $I_{31\max}$=0,7292; среднее $I_{31\mathrm{mid}}$=0,5745.

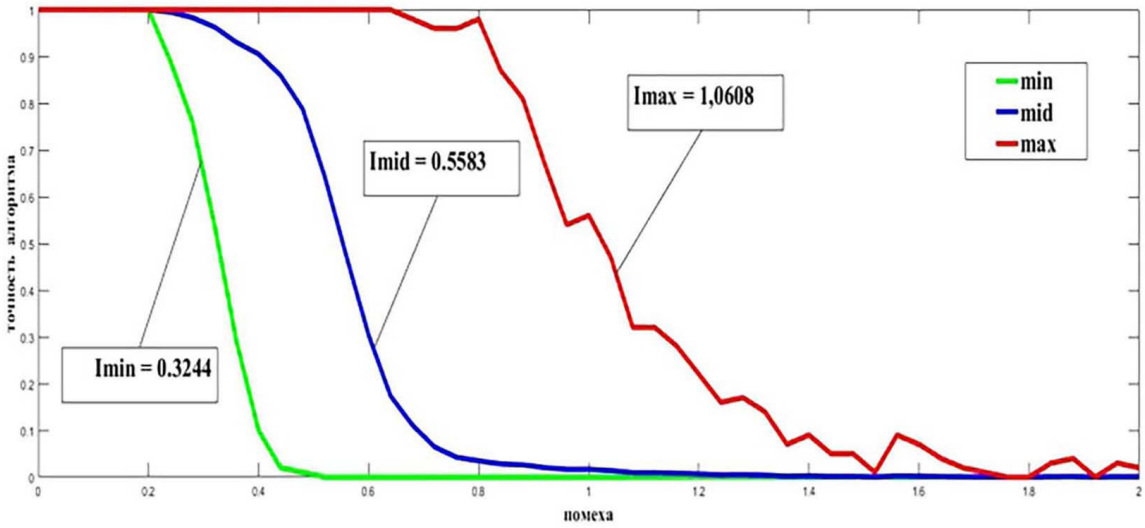


Рис. 1. Результаты моделирования ЛЛК1

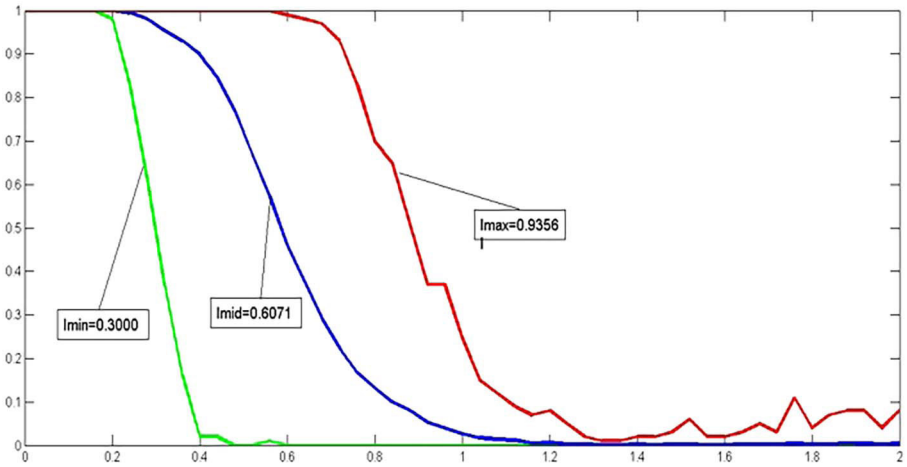


Рис. 2. Результаты моделирования ЛЛК2

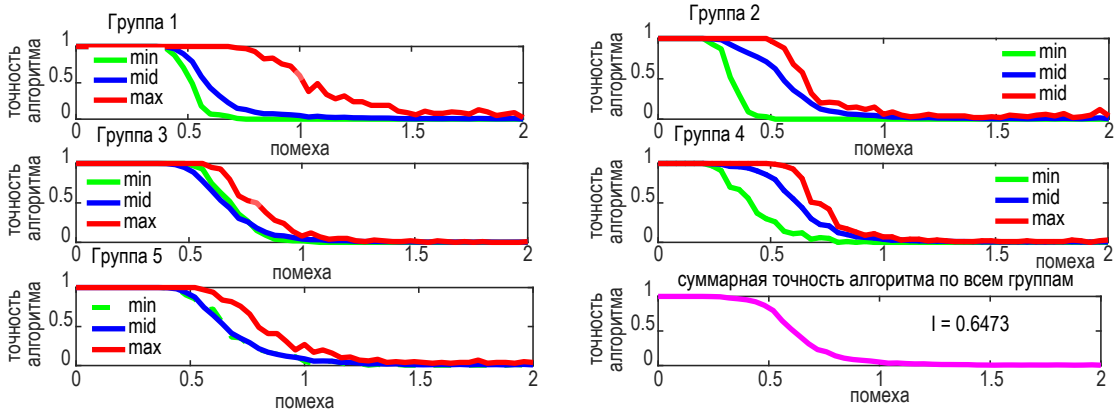


Рис. 3. Результаты моделирования ЛЛК3

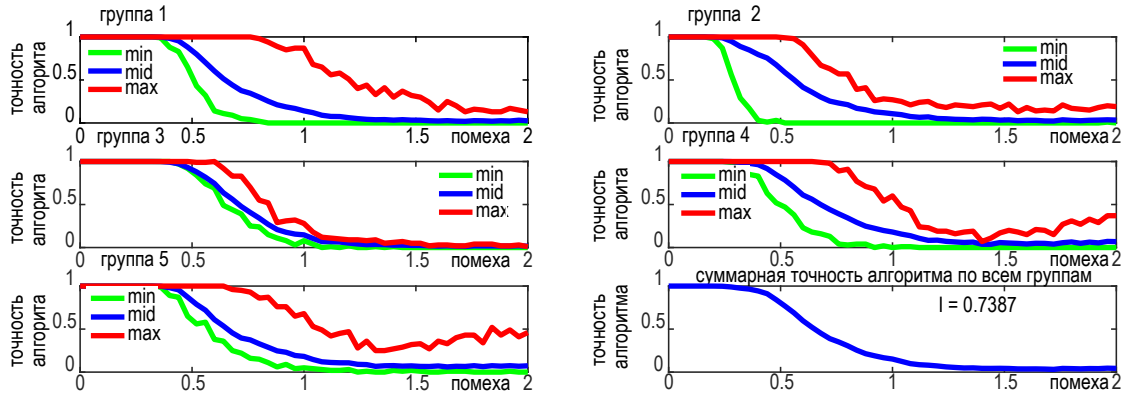


Рис. 4. Результаты моделирования ЛЛК4

– по группе объектов s_2: минимальное I_{32min}=0,6916; максимальное. I_{32max}=0,8174; среднее I_{32mid}=0,6850.

– по группе объектов s_3: минимальное I_{33min}=0,4312; максимальное. I_{33max}=0,7554; среднее I_{33mid}=0,6402.

– по группе объектов s_4: минимальное I_{34min}=0,6864; максимальное. I_{34max}=0,8884; среднее I_{34mid}=0,7066.

Для ЛЛК4:

– по группе объектов s_1: минимальное I_{41min}=0,2980; максимальное. I_{41max}=0,9950; среднее I_{41mid}=0,6389.

-по группе объектов s_2: минимальное I_{42min}=0,6804; максимальное. I_{42max}=0,8994; среднее I_{42mid}=0,7613.

– по группе объектов s_3: минимальное I_{43min}=0,5192; максимальное. I_{43max}=1,1726; среднее I_{43mid}=0,7722.

– по группе объектов s_4: минимальное I_{44min}=0,6064; максимальное. I_{44max}=1,3308; среднее I_{44mid}=0,7858.

Заключение

Предложенные интегральные оценки эффективности по результатам компьютерного моделирования алгоритмов классификации объектов в окружении выбора могут использоваться для оценки качества работы центральной нервной системы БПЛА. После распределения типов целей для БПЛА необходима, как показывают результаты компьютерного моделирования, дополнительная настройка и оптимизации коэффициентов значимости атрибутов моделей объектов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания по контракту № AAA-A19-119120290136-9.

Библиографический список

1. *Gorodetskiy A., Tarasova I.* Smart Electromechanical Systems. Situational Control. Studies in Systems, Decision and Control 261, Springer International Publishing, 2020. P. 3–13.

2. *Gorodetskiy A., Tarasova I., Kurbanov V.* Behavioral Decisions of a Robot Based on Solving of Systems of Logical Equations. Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System, Studies in Systems, Decision and Control 95, 2017. P. 61–71.

3. *Gorodetskiy A.* The Principles of Situational Control SEMS Group. Smart Electromechanical Systems. Situational Control. Studies in Systems, Decision and Control 261, Springer International Publishing, 2020. P. 3–13.

4. *Gorodetskiy A., Tarasova I.* Situational Control a Group of Robots Based on SEMS. Smart Electromechanical Systems. Group Interaction. Studies in Systems, Decision and Control 174, Springer International Publishing, 2019. P. 9–18.

5. *Бауэрс П.* Летательные аппараты нетрадиционных схем. М.: Мир, 1991. 320 с.

6. *Василин Н. Я.* Беспилотные летательные аппараты. Минск: Попурри, 2017. 272 с.

7. *Боброва А. С., Безденежных С. И.* Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами. Коломна, 2016. 274 с.

8. *Wagner W.* Lightning Bugs and other Reconnaissance Drones. The can-do story of Ryan's unmanned spy planes. Armed Forces Journal International. Aero Publishers.

9. *Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С.* Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Ч. 1: Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109–146.

10. *Цепляева Т. П., Морозова О. В.* Этапы развития беспилотных летательных аппаратов // Открытые

информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2009. № 42.

11. *Семенец В. О., Трухин М. П.* Способы противодействия беспилотным летательным аппаратам // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 3. С. 4–12.

12. *Иванов Д. Я.* Методы роевого интеллекта для управления группами малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Известия Южного федерального университета. 2011. № 3. С. 221–229.

13. *Gorodetskiy A., Tarasova I., Kurbanov V.* Classification of Images in Decision Making in the Central Nervous System of SEMS. In: Smart Electromechanical Systems: Behavioral decision making. Studies in Systems, Decision and Control. 2021. Vol. 352. P. 187–197.

14. *Gorodetskiy A., Tarasova I.* Image classification system in the SEMS selection environment. Smart Electromechanical Systems: Behavioral decision making. Studies in Systems, Decision and Control. 2021. Vol. 352. P. 197–200.

УДК 004.77

Л. В. Соболева*
ассистент
Н. И. Гарматий
студент
К. С. Исаков*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СРАВНЕНИЕ ПРОТОКОЛОВ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Проведен анализ протоколов и стандартов беспроводной связи интеллектуальных устройств, отличающихся друг от друга стандартами связи, скоростью передачи данных, энергопотреблением, взаимной совместимости устройств, радиусом действия.
Ключевые слова: *беспроводные технологии, протокол связи, топология, ячеистая сеть.*

L. V. Soboleva*
Assistant
N. I. Garmatiy
Student
K. S. Isakov*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

COMPARISON OF WIRELESS COMMUNICATION PROTOCOLS OF SMART DEVICES

The analysis of the protocols and standards of wireless communication of intelligent devices, which differ from each other in communication standards, data transfer rate, power consumption, mutual compatibility of devices, and range, was carried out.
Keywords: *wireless technology, communication protocol, topology, mesh network.*

Современный мир развивается семимильными шагами благодаря научно-техническому прогрессу. Развитие цифровых и инфокоммуникационных технологий свидетельствует о качественном скачке скорости развития, который принес в жизнь человека не только ряд возможностей, но и новых проблем [1].

Человек стремиться создать вокруг себя «умное» неодушевленное окружение, которое своими функциональными возможностями позволяет осуществлять дистанционный контроль и управление. Для общения таких устройств с человеком и между собой были созданы разные «языки» – протоколы связи [2]. Они бывают проводные и беспроводные. В данной работе будут рассматриваться набирающие популярность беспроводные протоколы связи, поскольку они делают систему модульной и мобильной, что позволяет создать «умный дом» на заранее необорудованном объекте.

Требования к беспроводным интеллектуальным устройствам

Перед тем как более детально разбирать беспроводные протоколы связи, перечислим требования к беспроводным интеллектуальным устройствам, на которые будем опираться.

- Минимальное энергопотребление, чтобы увеличить время работы от батареи и использовать большее количество устройств в ограниченном пространстве.
- Стабильный сигнал с минимальной задержкой, позволяющий связаться с другим устройством в пределах заявленным радиусом действия. Для качественной передачи данных в беспроводных сетях необходимо отсутствие помех и препятствий.
- Шифрование личных сообщений устройства, обеспечивающие защиту передачи данных, при этом не усложняя подключение нового устройства.

• Настраивание расписания или автоматических сценариев с возможностью работы по обстоятельствам.

• Взаимная совместимость, обеспечивающая «общение» между устройствами разных производителей одного и того же протокола [3].

Стандарты беспроводной связи

Рассмотрим четыре стандарта беспроводной связи для интеллектуальных систем.

1. Wi-Fi.

Наиболее часто встречающейся беспроводной сетевой технологией является Wi-Fi (Wireless Fidelity – от англ. «беспроводная точность»). Данный протокол имеет топологию «звезда», а это означает, что все ее узлы соединяются непосредственно с центральным элементом – беспроводным маршрутизатором. Конечные устройства можно добавлять и удалять из сети без оказания влияния на передачу данных. Институт инженеров электротехники и электроники (IEEE) создал семейство протоколов 802.11, которые приобретают большую скорость с каждым поколением, для передачи значительных объемов информации [2].

2. Zigbee.

Zigbee – беспроводная технология, разработанная как открытый глобальный стандарт для удовлетворения уникальных потребностей недорогих и маломощных беспроводных сетей Интернета вещей.

В отличие от Wi-Fi, Zigbee имеет меньшую дальность действия – около 10–20 м в помещении, поскольку потребляет меньше энергии. Это значительно увеличивает время автономной работы устройств. Данный стандарт позволяет создавать датчики с хорошей отзывчивостью.

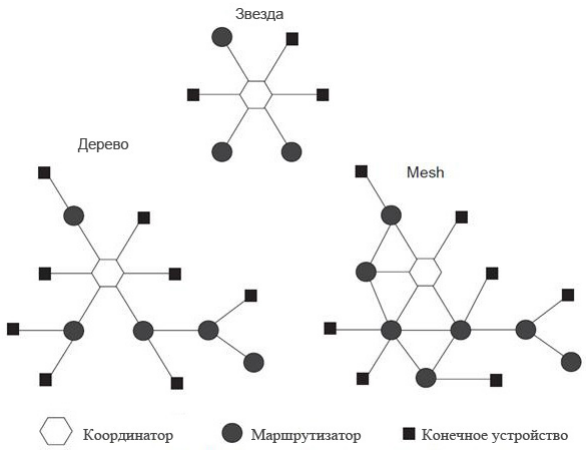


Рис. 1. Топология сети «mesh»

Протокол работает в ячеистой сети (mesh-сеть) (рис. 1), то есть он повторяет сигналы, передает их от одного устройства к другим в пределах диапазона, что обеспечивает высокую отказоустойчивость и надежность [4]. Также он является одним из самых безопасных протоколов, но с плохой взаимной совместимостью устройств.

3. Z-Wave.

Z-Wave – беспроводной протокол ячеистой сети, основное отличие которого от предыдущего стандарта в том, что он примерно в 6 раз медленнее и потребляет меньшее количество энергии. Самым большим преимуществом данного протокола является совместимость устройства с другими с таким же стандартом вне зависимости от типа и марки.

4. Bluetooth.

Bluetooth – это стандартизированный протокол для передачи и приема данных по беспроводной связи. Это безопасный протокол, и он идеально подходит для коротких, маломощных, недорогих беспроводных передач между электронными устройствами.

Сети Bluetooth используют модель master/slave («звезда») для управления тем, когда и где устройства могут отправлять данные (рис. 2). В этой модели одно ведущее устройство (master) может быть подключено к семи различным ведомым устройствам (slave). Любое ведомое устройство сети может быть подключено только к одному ведущему. Master координирует связь по всей сети. Он может отправлять данные любому из своих подчиненных и запрашивать данные у них. Ведомым устройствам разрешено только передавать и получать данные от ведущего устройства. Они не могут обмениваться информацией с другими ведомыми устройствами в сети.

Самое последнее обновление Bluetooth – Bluetooth v4.0, который делит спецификацию Bluetooth на три категории: классическую, высокоскоростную и низкоэнергетическую. Действительно выдающейся особенностью Bluetooth v4.0 является Bluetooth low energy (BLE).

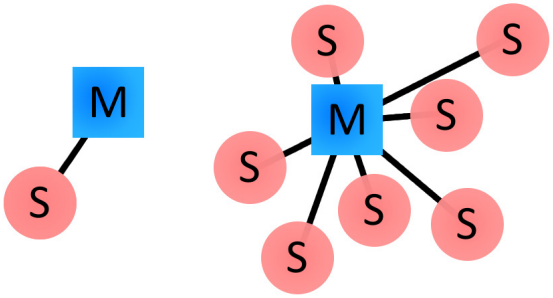


Рис. 2. Топология сети «master/slave»

Таблица 1

Сравнение протоколов беспроводной связи

Технология	Wi-Fi	ZigBee	Z-Wave	Bluetooth (BLE)
Стандарт связи	IEEE 802.11	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.1
Скорость передачи данных	300+Мбит/с	250 Кбит/с	250 Кбит/с	До 3 Мбит/с
Энергопотребление	Высокое	Низкое	Низкое	Низкое
Частотный диапазон	2,4 ГГц, 5 ГГц	0,868 ГГц, 0. 915 ГГц, 2,4 ГГц	2,4 ГГц	2,4 ГГц
Максимальная дальность действия	100–250 м	10–100 м	10-30 м	50 м
Топология	«звезда»	«mesh»	«mesh»	«звезда»
Время автономной работы	Часы	От нескольких месяцев до нескольких лет	От нескольких месяцев до нескольких лет	От нескольких месяцев до нескольких лет

BLE – это массовый пересмотр спецификаций Bluetooth, направленный на очень маломощные приложения. Он жертвует дальностью действия (50 м вместо 100 м) и пропускной способностью передачи данных (0,27 Мбит/с вместо 0,7–2,1 Мбит/с) для значительной экономии энергопотребления. BLE ориентирован на периферийные устройства, которые работают от батарей и не требуют высокой скорости передачи данных или постоянной передачи данных [3].

Сравнение беспроводных протоколов связи

Для проведения наглядного сравнительного анализа обратимся к табл. 1.

Таким образом, ZigBee часто является хорошим выбором для мониторинга сетей, например, проектов домашней автоматизации. Эти сети могут иметь десятки беспроводных узлов, которые редко активны и никогда не должны отправлять много данных.

BLE сочетает в себе удобство классического Bluetooth и значительно снижает энергопотребление. Таким образом, он может конкурировать с ZigBee и Z-Wave за время автономной работы. BLE не может конкурировать с ними по размеру сети, но для подключения одного устройства к другому он очень сопоставим.

Wi-Fi лучше всего подходит для целей выхода в Интернет. Он быстр и гибок, но также требует большой мощности, что сильно сказывается на автономности.

По совместимости устройств выигрывает Z-Wave.

Однако выбор беспроводной технологии определяется поставленной целью, имеющимся количеством времени, требуемой скоростью соединения, расстоянием, а также предельно допустимыми финансовыми затратами.

Библиографический список

1. *Шестакова И. Г.* Новая темпоральность цифровой цивилизации: будущее уже наступило // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Гуманитарные общественные науки. 2019. № 2. С. 20–29.

2. *Яковлев А. С.* Выбор протокола для умного дома. Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee или Z-Wave. URL: https://smarthomegadget.ru/vybor-protokola-dlya-umnogo-doma-wi-fi-bluetooth-zigbee-ili-z-wave/ (дата обращения: 30.01.2022).

3. Z-Wave vs ZigBee, WiFi, Thread, Bluetooth BLE: выбираем протокол управления умным домом. URL: https://superhome.pro/z-wave-vs-zigbee-wifi-thread-bluetooth-ble-vybiraem-protokol-upravleniya-umnym-domom/#_bbv5k98f5jjp16 (дата обращения: 31.01.2022).

4. Протоколы умный дом. URL: https://knx24.com/news/base/smart_home_protocols/ (дата обращения: 31.01.2022).

УДК 004.75 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-87-96**

С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
И. А. Воропаев*
ассистент
М. П. Недомолкин*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

В статье рассматривается применение современных автоматизированных систем управления дорожным движением (АСУ ДД). Дается основное представление об устройстве и принципе работы как АСУ ДД в целом, так и основных его элементов, в частности. Подробно описывается принцип действия дорожных контроллеров (ДК). Обозначаются основные принципы и стандарты (международные и российские) безопасности при проектировании АСУ ДД.
Ключевые слова: *АСУ ДД, светофорное оборудование, управление трафиком, дорожный контроллер, микроконтроллер, безопасность АСУ.*

S. V. Solyonyi*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
I. A. Voropaev*
Assistant
M. P. Nedomolkin*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ABOUT THE AUTOMATED TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEM

The article discusses the use of modern automated traffic control systems (ASMDS). The basic idea of the device and the principle of operation of both the automated control system as a whole and its main elements, in particular, is given. The principle of operation of road controllers (DC) is described in particular. The basic principles and standards (international and Russian) of safety in the design of automated control systems are outlined.
Keywords: *automated control system DD, traffic light equipment, traffic control, road controller, microcontroller, automated control system safety.*

Безопасность передвижения людей в городе во многом определяется наличием современной, качественной дорожной инфраструктуры. Помимо этого, необходимо обеспечить автоматизированный контроль во время передвижения пешеходов и других участников дорожного движения по городу, разделить транспортные потоки от потоков пешеходов и других участников дорожного движения [1]. Данный подход позволяет снизить количество дорожных происшествий с участием людей и улучшить безопасность как в городе, так и за его пределами.

Автоматизированная система управления дорожным движением (АСУ ДД) – это комплекс аппаратно-программных средств по управлению, сбору и обработке информации, получаемой во время управления потоками транспортных средств и пешеходов [2].

АСУ ДД состоит из:
- мониторинга транспортных потоков;
- контроллеров дорожного движения;
- светофорного оборудования (СО);
- видеофиксации (IP-камеры);
- вспомогательного оборудования.

Структура

Основным субъектом управляющего воздействия в АСУ ДД является светофорное оборудование.

Светофорное оборудование (СО) – устройство регулирования пешеходными и транспортными потоками. Светофорное оборудование не может управлять движением без специальной системы управления, с которой оно связывается. Система управления СО является основой по-

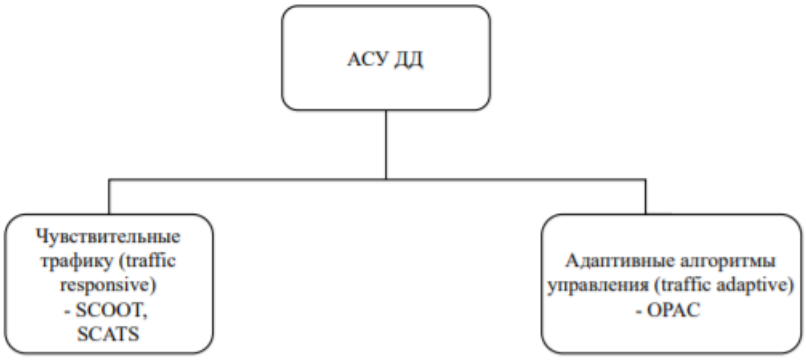


Рис. 1. Современные АСУ ДД

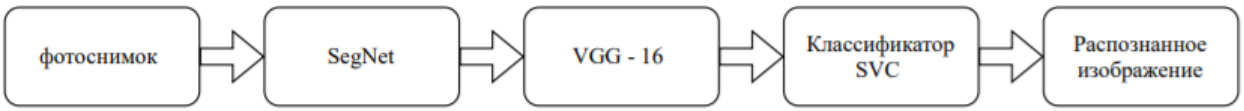


Рис. 2. Система распознавания изображений

строения любой транспортной системы в современное время.

Именно она распределяет направления движения транспортных потоков, связывается с центром управления дорожным движением (ДД), анализирует видеоданные и погодные условия, создает безопасные условия для передвижения людей.

Специализированные электронно-вычислительные машины (ЭВМ) появились в США с 1960-х годов. Изначально они реализовывались на базе IBM 650, IBM 1130, IBM 1800 и к 1973 году могли осуществлять управление от 20 до ~900 перекрестками. В 1970-х годах британское бюро TRRL (The Transport and Road Research Laboratory) разработало и внедрило систему транспортного регулирования светофорами SCOOT [3].

Сегодня данная система обладает не только СО, но и различными детекторами, видео- и фотофиксацией, постоянной связью с центром управления ДД.

В настоящее время системы SCOOT и SCATS используют алгоритмы чувствительные к трафику, а система OPAC основана на адаптивных алгоритмах управления (рис. 1).

В зависимости от вида и наличия того или иного оборудования в конкретной АСУ ДД появилась классификация светофорных объектов.

– *Адаптивный*

Данный вид светофорных объектов используется исключительно на прилегающих направлениях движения, то есть не на основных транспортных магистралях. Все из-за того, что камеры, сканирующие пространство перед СО, плохо различают объекты и требуют постоянного обслуживания. На побочных транспортных линиях могут использоваться за счет нового вида индукционной петли – магнитного датчика[1].

– *Нейросетевой*

Современный и часто встречающийся вид светофорных объектов.

Размещение на трассах с любым типом трафика.

Такие светофоры не требуют постоянного обслуживания за счет специально разработанного ПО. Система распознавания объектов состоит из двух сверточных нейронных сетей (СНС) и классификатора [4].

На (рис. 2) изображена СНС SegNet – глубокая СНС, разработанная для семантической пиксельной сегментации. Иначе говоря, SegNet воспроизводит данные ввода с низким разрешением. На выходе получается сегментированное изображение, каждый сегмент классифицируется в зависимости от объекта. Сегментированное изображение поступает на предобученную СНС VGG-16, которая используется для классификации изображений за счет натренированности на большом датасете (ImagNet). С помощью алгоритма обучения с учителем SVC происходит

[1] Магнитный датчик – вид индукционной петли, который работает в виде детектора транспорта и, с помощью беспроводного/проводного интерфейса, взаимодействует с главным контроллером (FlexMag sensors / Протокол: Sensys NANOPOWER).

классификация объектов по классам и их последующее распознавание.

– *Геоинформационные*

Экспериментальный вид светофорных объектов, разработанный на основе анализа траффика транспорта по GPS и GLONASS.

Редкий вид СО из-за наличия особенностей при работе в различных условиях.

Система обработки информации

Контроллер является главным звеном в системе управления ДД. Он лежит в основе первичной системы АСУ ДД и в сочетании с DLS модемом создают систему непрерывного информирования центра управления ДД.

Современные системы первичного управления СО (сервер АСУ ДТ) строятся на RISC – микроконтроллерах. Набор команд, используемый в RISC архитектуре, определяет быстродействие и принцип обработки информации в микропроцессоре. Примером RISC-микроконтроллера могут служить собственные микропроцессоры от Apple – A12, A13, A14, M1 и т. д. Все они используют архитектуру набора команд ARM. Процессоры, построенные на архитектуре ARM быстрее процессоров с архитектурой x86/x64 от Intel или AMD.

Микроконтроллеры, обрабатывающие сигналы с детектора транспорта (ДТ) и дорожного контроллера (ДК) должны делать это значительно быстрее процессоров на обычных ПК или серверах.

Процессоры от Intel или AMD не используют в данной сфере еще и по причине безопасности связанной с гипертредингом/аппаратными потоками[1].

На данный момент существуют готовые решения, связанные с аппаратной и программной настройкой безопасности микроконтроллера.

Например, австрийская компания SWARCO [5] специализируется на управлении трафиком и безопасности ДД, разметкой дорог и другими решениями. Основная продукция этой компании – это ДК, контроллеры связи и другие интеллектуальные системы управления трафиком.

Оборудование данной компании обеспечивает безопасность ДД в США, большинстве стран Европы, России, некоторых восточных стран, таких как Саудовская Аравия.

Одним из основных продуктов компании является дорожный контроллер ITC-3. Он поставляется в трех модификациях в зависимости от количества направлений движения и количества индукционных петель (ДТ). ДК построен на процессоре ARM, управляемым ОС Linux, имеет два процессора безопасности, комбинированную плату с модемом, GPS – приемником и 4 – канальное устройство ввода/вывода, в добавок, есть передняя панель с сенсорным экраном и средствами программирования, а также выносной пункт управления (ВПУ) и табло вызова пешехода (ТВП).

Другим продуктом данной компании, без которого невозможно представить современный ДК, является контроллер связи SHDSL – PROXY ROUTER. Этот контроллер связи оснащен ARM процессором Atmel AT91RM9200 с тактовой частотой до 180 МГц и обладает быстродействующей SRAM-памятью и шиной внешнего интерфейса (EBI) для подключения к внешней памяти или программируемой периферии. Контроллер также управляется ОС Linux и поддерживает протоколы передачи данных: SCP, Telnet, FTP и DHCP, а также протокол OSPF (Open Shortest Path First) для динамической маршрутизации, чтобы обеспечить функции резервирования сети и распределения нагрузки. ДК ITC-3 поддерживает семейство стандартов, разработанных для обеспечения взаимодействия и взаимозаменяемости между компьютерами и электронным оборудованием управления движением от разных производителей – NTCIP [6].

Прокси-пакеты программного обеспечения могут быть установлены для связи с ДТ разных типов.

Подключение дорожного контроллера и главного сервера для управления ДД осуществляется как в проводном (Ethernet RJ45 10/100 Мбит/с), так и в беспроводном режиме (WiFi, Bluetooth).

Существует возможность подключения DSL-модема для увеличения скорости передачи данных в проводном режиме с использованием уже существующих линий передачи информации по кабелям телефонной связи.

Исходя из всего вышеперечисленного можно обозначить структуру современного дорожного контроллера (рис. 3).

Помимо основных компонентов в состав ДК входят: блоки питания, UPS-системы, коммутаторы и компараторы.

Несмотря на наличие в крупных городах России продукции компании SWARCO, в нашей стране существуют собственные готовые решения [7]–[9] по реализации систем SCOOT или SCATS.

Компания «Электротекс» реализовывает безопасные транспортные системы, а также создает центы управления АСУ ДД, такие компании как «ЭЛСИСТАР», которые не только создают отдельные элементы АСУ – дорожные контрол-

[1] Аппаратные потоки/гипертрединг – разбитие потока на несколько частей для заполнения «пробелов» в конвейере. Таким образом, в один элемент конвейеров могут встраиваться другие части потока.

леры «ИНТЕЛКОМ», но и системные концепции на основе SCOOT – «Мегаполис». Интернет-ресурсы «Промсигнал» и «ТЕЛЕМЕХАНИКА» содействуют в реализации системы «Мегаполис» в других городах России.

Данная система используется в шести крупных городах России (Ростов-на-Дону, Ставрополь, Кемерово, Рязань, Астрахань, Курск, Нальчик), а в стадии пилотного проекта Санкт-Петербург, Новосибирск, Псков, Майкоп.

Системная концепция «Мегаполис» основывается на тех же принципах, что и системы компании SWARCO (рис. 4).

Дорожный контроллер УК-4.1М «ИНТЕЛКОМ» [10], также построен на RISC-микропроцессоре (АПИ-2000), в данном случае это микросхема

Рис. 3. Структура ДК

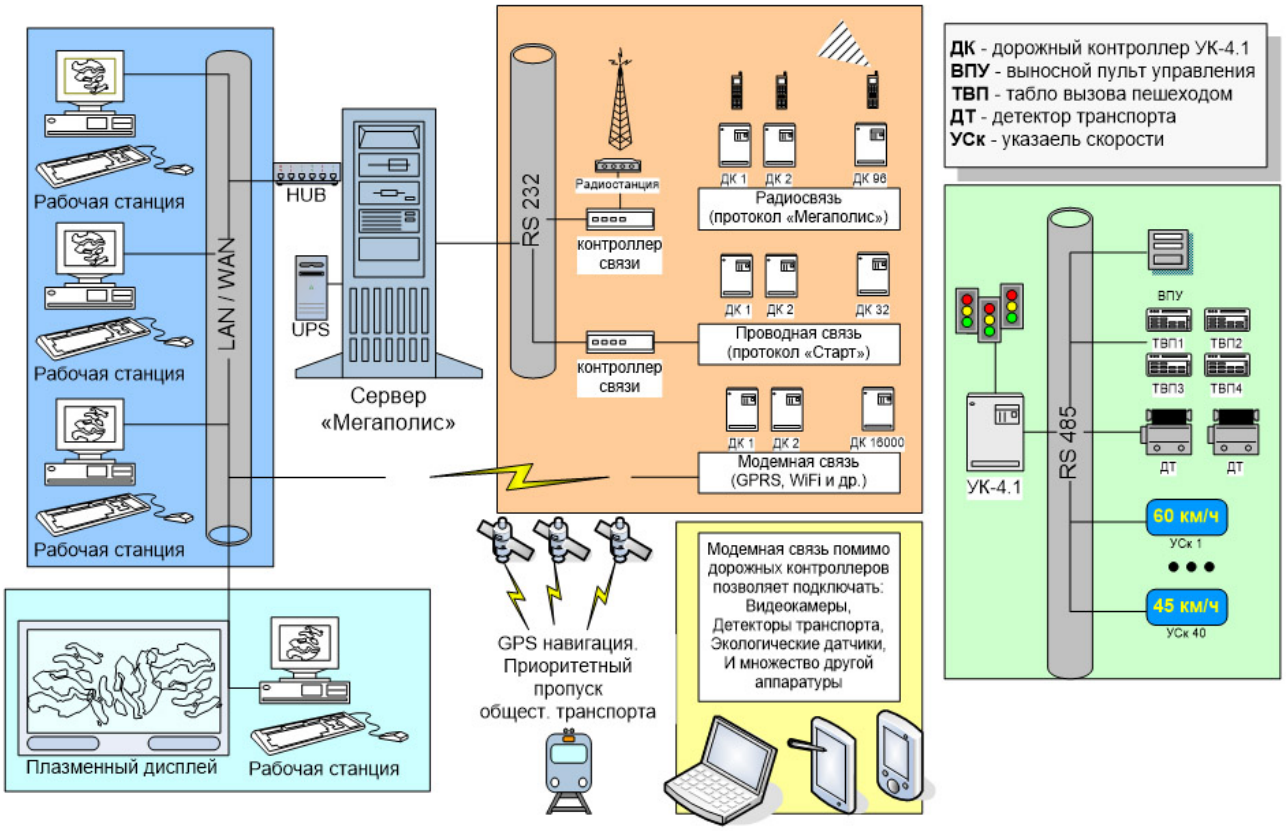


Рис. 4. Система «Мегаполис»

AT89S55 фирмы «ATMEL», представляет собой 8-разрядный микроконтроллер, со встроенной памятью, в которой хранится управляющая программа. Программа написана на языке ассемблера для микроконтроллера семейства MCS51.

Существуют и другие ДК: УК-4.1М, ДКСТ-16С-00, ДКСТ-16С-23, ДКСТ-16С-27.

Другие фирмы-производители: КМС-5, КДУ/3.2Н/3.3Н, МДК, КСО-12-3.

Последние из перечисленных видов ДК имеют субблочное распределение контроллеров, данный механизм позволяет модифицировать ДК или же устранять неисправности путем ремонта конкретного субблока. Все ДК поддерживают стандарты связи: GSM, GPRS, EDGE, TCP/IP, LAN, WAN (в зависимости от комплектации). Реализованы модули GPS/GLONASS. Все ДК компании «ЭЛСИСТАР» поддерживают конвертеры интерфейсов RS232/RS-485. ДК используют асинхронный последовательный интерфейс (АПИ), который служит для связи и взаимодействия друг с другом узлов и блоков контроллера: платы процессора, сетевого адаптера, инженерного пульта, ВПУ, указателя скорости (УСК), табло обратного отсчета времени и других устройств. АПИ осуществляется по принципу «мастер/помощник». Плата процессора – «мастер», остальные узлы контроллера – «помощники».

Во всех ДК, производимых в России, нет отдельного сетевого контроллера, в данном случае он представлен в виде субблока – сетевого адаптера конкретного ДК. Также отечественные ДК могут работать с системами координированного управления АСУДД «МЕГАПОЛИС», АСУДД «СТАРТ» (при наличии соответствующего блока адаптера), АСУДД «КОМКОН» по ВОЛС TCPIP и по каналу GPRS.

Сравнение

Основное различие между актуальными дорожными контроллерами и другими узлами АСУ ДД от различных производителей из различных стран заключается в контроллерах и периферийном оборудовании. Большинство производителей основывается на концепции систем SCOOT и SCATS. Также существуют некие различия в применяемых протоколах передачи данных, используемых при разработке нового дополнительного оборудования, и стандартах безопасности дорожного движения разных стран.

Стандарты безопасности

В России в области АСУ существует ряд требований и при разработке АСУ ДД. В частности, требования к информационной безопасности специализированных АСУ разрабатываются в соответствии с положением ФСТЭК [11].

Принятие требований осуществляется по следующим критериям:

• Необходимость защиты информации в данной АСУ (ГОСТ Р 51624 «Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении»).

• Классификация АСУ по уровню значимости (ГОСТ 34.602 «Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы»).

• Определение угроз безопасности для каждого из уровней АСУ (Абзац в редакции, введенной в действие с 17 сентября 2018 года приказом ФСТЭК России от 9 августа 2018 года № 138.)

• Требования к системе защиты АСУ (ГОСТ 34.602, ГОСТ Р 51583, ГОСТ Р 51624).

Основным стандартом безопасности при разработке электрической/электронной/программируемой электронной (Э/Э/ПЭ) системы (electrical/electronic/programmable electronic) является ГОСТ IEC 61508-2018 (МЭК 61508). Данный стандарт представляет собой верхний уровень целого семейства отраслевых стандартов, которые детализируют требования к функциональной безопасности для систем управления медицинским оборудованием, автомобильным и железнодорожного транспортом, АСУ ТП и т. д.

МЭК 61508-1 и МЭК 61508-2 – разработка и распределение требований ко всей системе безопасности, а также реализация функциональной безопасности.

МЭК 61508-3 – положения по разработке безопасного ПО для АСУ.

МЭК 61508-4 – функции безопасности и полнота безопасности (safety integrity): ремонтопригодность, готовность, долговечность, информационная безопасность.

Уровень полноты безопасности (Safety Integrity Level, SIL) – Значение SIL устанавливает в зависимости от того, насколько влияние управляемого оборудования создает риск для людей и окружающей среды. Исходя из этого, установлен риск отказа. Для программируемых логических контроллеров (ПЛК), используемых в АСУ ТП (ДД), достижимым является SIL3.

Иностранные средства АСУ ДД создаются с учетом международных требований к электробезопасности и безопасности АСУ и включают:

• EN 12675: 2000. Контроллер сигнала светофоров, требования функциональной безопасности;

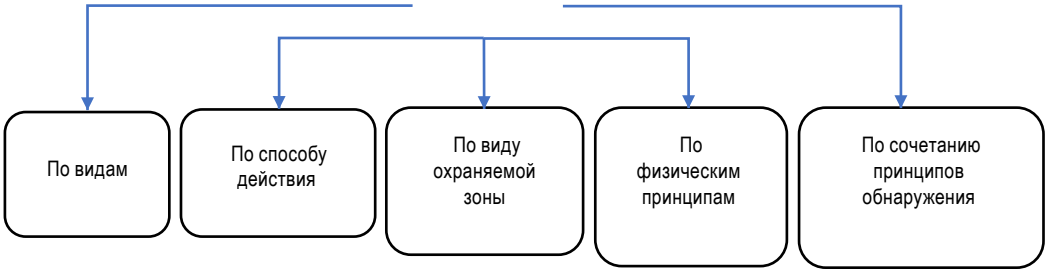


Рис. 5. Структура ТСОС

• EN 50293: 2012. Системы дорожной сигнализации, электромагнитная совместимость;
• EN 50556: 2011. Системы сигнализации дорожного движения;
• EN 60950-1: 2006. Системы информационных технологий, безопасность;
• Процессоры безопасности в соответствии с EN61508 SIL3.

Российские стандарты безопасности для сравнения с иностранными будем проводить, рассматривая основные технические средства, включенные в работу современной транспортной системы. Для этого проведем анализ российских стандартов по составляющим. Основными в данной сфере в РФ являются следующие стандарты:

– ГОСТ Р 56461-2015 – «Безопасность транспортная» (Реализация норм Федерального закона от 9 февраля 2007 года № 16-ФЗ «О транспортной безопасности» с изменениями и дополнениями») [12];

– ГОСТ Р 51624-20ХХ – «Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении» [13];

– ГОСТ Р 51583-2014 – «Порядок создания автоматизированных систем в защищенном исполнении» [14];

– Межгосударственный стандарт ГОСТ IEC 61508-2018 (МЭК 61508) – «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью» [15].

4.1. Средства и системы сигнализации

Основным стандартом в данной области является ГОСТ Р 52435-2015 – «Технические средства охранной сигнализации».

Техническое средство охранной сигнализации (ТСОС) – конструктивно законченное устройство, выполняющее самостоятельные функции и входящее в состав системы охранной (охранно-пожарной) сигнализации.

Стандарт устанавливает классификацию основных видов технических средств охранной сигнализации, общие технические требования и методы испытаний технических средств охранной сигнализации, предназначенных для работы в системах охранной, тревожной сигнализации, системах централизованного наблюдения и интегрированных системах безопасности.

В данном стандарте ТСОС классифицируются (рис. 5).

Стандарт ТСОС предполагает в том числе и использование в объектах транспортной инфраструктуры, не только для предотвращения несанкционированного доступа к охраняемым объектам, но и для отслеживания состояний транспортного средства за счет применения датчиков с различными физическими принципами, а именно электроконтактные, магниточувствительные, радиоволновые, звуковые, вибрационные, оптико-электронные (инфракрасные) как активные, так и пассивные[1].

4.2. Средства контроля доступа

Основным стандартом систем контроля доступом является ГОСТ Р 51241-2008 – «Средства и системы контроля и управления доступом».

Система контроля и управления доступом (СКУД) – совокупность средств контроля и управления доступом, обладающих технической, информационной, программной и эксплуатационной совместимостью. Данный стандарт распространяется на средства и системы кон-

[1] *Извещатель активный* – извещатель, создающий на охраняемом объекте, части объекта рабочую среду (волновое поле, излучение, искусственное давление или иной физический процесс) и формирующий извещение о тревоге при обнаружении вызванного действиями нарушителя изменения параметров данной среды.

Извещатель пассивный – извещатель, не создающий на охраняемом объекте активную рабочую среду (физический процесс), формирующий извещение о тревоге при изменении состояния охраняемого объекта.

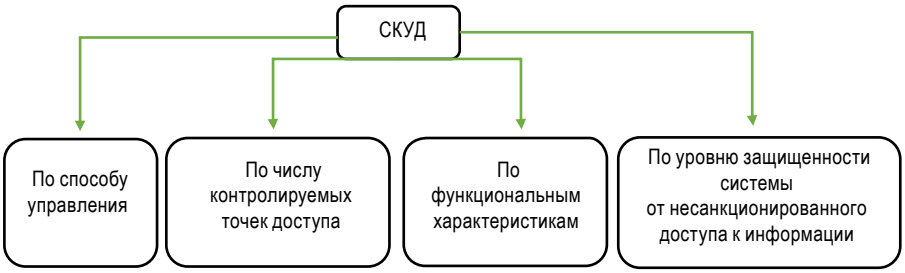


Рис. 6. Классификация СКУД

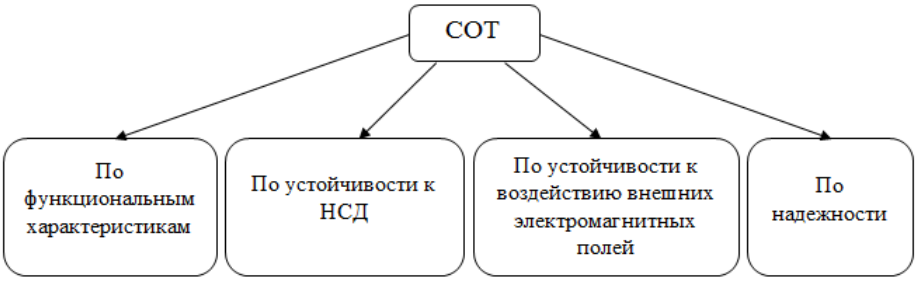
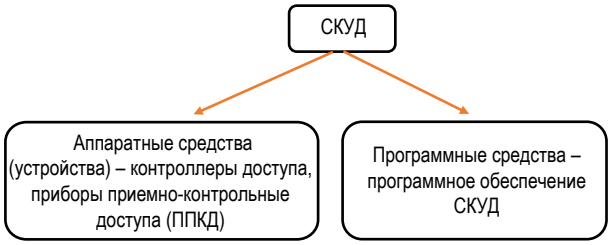


Рис. 7. Классификация СОТ

троля и управления доступом, предназначенные для предотвращения несанкционированного доступа людей, транспорта и других объектов в зону (из зоны) доступа (здания, помещения, территории, транспортные средства) в целях предотвращения несанкционированного доступа на защищенные объекты.

СКУД состоит из:



Стандарт предполагает классификацию средств КУД следующим образом (рис. 6).

Несанкционированные действия (НСД) – действия с целью несанкционированного проникновения в зону доступа через преграждающие управляемые устройства (УПУ).

СКУД предполагает использование на защищенных и ограниченных для свободного посещения объектах, но данные средства ограничения доступа во многом являются частью инфраструктуры современных городов. Подобные средства и сейчас установленные на многих КПП, также около служебных помещений, находящихся в общественном пользовании.

4.3. Средства аудио- и видеонаблюдения

Стандарт ГОСТ Р 51558-2014 раскрывает понятие «Средства и системы охранные телевизионные». Система охранная телевизионная (СОТ) (CCTV) – система видеонаблюдения, представляющая собой телевизионную систему замкнутого типа, предназначенную для противокриминальной защиты объекта. Данный стандарт распространяется на вновь разрабатываемые и модернизируемые системы охранные телевизионные (далее – СОТ) и технические средства (далее – ТС) в составе СОТ, предназначенные для получения аудио- и (или) видеоинформации с охраняемого объекта в целях обеспечения противокриминальной защиты.

СОТ классифицируют по следующим признакам (рис. 7).

Системы СОТ, применяемые в ТБ, созданы для отслеживания состояния транспортных средств и получения актуальной информации на объектах дорожной инфраструктуры. СОТ позволяют системам первичного управления светофорными объектами (сервер АСУ ДТ)[1] пе-

[1] *Сервер АСУ ДТ* – первичное звено управления ДД или контроллер, собирающий и передающий информацию в центр управления ДД.

Рис. 8. Принципы ИБ по защите АСУ

редавать сформированную информацию о состоянии необходимых объектов в центр управления дорожным движением (ДД).

4.4. Средства передачи и защиты информации

Стандарты, обеспечивающие исполнение требований по передаче и защите информации, является основополагающим при разработке АСУ ДД, в том числе и систем в защищенном исполнении (АСЗИ). Необходимость защиты и передачи информации при обеспечении ТБ появилась при развитии сложных, интеллектуальных автоматизированных систем, которые в свою очередь обеспечивают целостность дорожной инфраструктуры в настоящее время.

К неназванным стандартам относятся:

– ГОСТ Р IEC 62443-2-1-2015 (МЭК 62443) – «Защищенность (кибербезопасность) сети и системы» [16];

– ГОСТ Р 51583-2014 – «Порядок создания автоматизированных систем в защищенном исполнении»;

– ГОСТ Р 51624-20XX – «Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении»;

– Межгосударственный стандарт ГОСТ IEC 61508-2018 (МЭК 61508) – «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью».

В России использование методических документов специализированных АСУ, в том числе

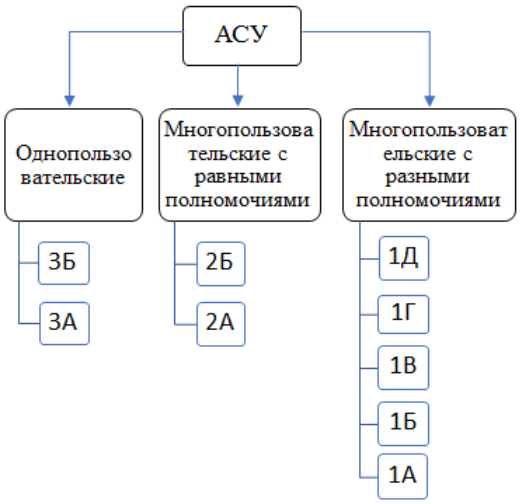


Рис. 9. Классификация АСУ

АСУ ДД, не обходится без стандартов, рекомендуемых ФСТЭК.

Общие положения по защите информации в АСУ распространяются и на ТБ (рис. 8).

Классификация АСУ по защищенности информации от НСД (рис. 9).

Обычно при построении концепции обеспечения ИБ руководствуются разделением АСУ на уровни (Security Level, SL). Эти уровни определяются в зависимости от характерных угроз, рисков, функций, в том числе и по классификации, указанной выше. Данные уровни неразрывно связаны с уже применяемыми в АСУ уровнями функциональной безопасности (ФБ), называемыми Safety Integrity Level (SIL). В стандартах можно найти несколько подходов к разделению АСУ на Security Level. Мы остановимся на зонировании, предложенном в ISA/IEC 62443 (рис. 10).

СОИБ – Система обеспечения информационной безопасности.

В пределах одной зоны размещения оборудования целесообразно обеспечивать один и тот же уровень ИБ, а между зонами информационный обмен осуществляется по контролируемым каналам и «сверху-вниз». Таким образом, защита АСУ выстраивается или на одном уровне ИБ,

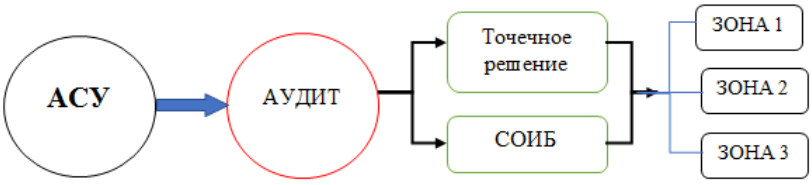


Рис. 10. Метод зонирования

или от более высокого уровня ИБ к более низкому уровню ИБ, но не наоборот.

Однако метод зонирования является одним из элементов при анализе и моделировании объекта защиты по тому же ISA/IEC 62443 [17] Полный процесс разработки модели АСУ состоит из трех стадий:

– Reference model (референсная модель) – определение основных видов деятельности АСУ, определение пяти логических уровней;

– Asset model (модель активов) – описывает иерархическую карту основных объектов и активов, взаимодействие с сетями, территориальными площадками, ключевыми подразделениями, участвующими в ТП, системами контроля и прочим технологическим оборудованием;

– Reference architecture model (референсная модель архитектуры) – отражает все основные элементы АСУ, телекоммуникационное оборудование, линии связи и т. п. Именно на основе референсной модели архитектуры строится модель зонирования, разделяющая объекты защиты на несколько уровней. Понятие Security Level или «уровень безопасности» стало использоваться при оценке ИБ каждого уровня.

В АТС повсеместно используется метод зонирования. В современных городах транспортные средства преодолевают множество объектов транспортной инфраструктуры: шлагбаумы, КПП, многоуровневые парковки, места ограниченного доступа и АЗС, все они используют зонное разделение, включаявсе средства, указанные раннее. Важно обратить внимание на жизненный цикл в АСУ. В соответствии с ГОСТ IEC 61508-2018 в АСУ реализуется V-образный жизненный цикл, который характеризуется этапами анализа и тестирования после каждого из этапов разработки [18], [19], [23].

Для того чтобы соответствовать требованиям к ФБ, реализуемый выше цикл (Security Life Cycle) должен удовлетворять стандартам ИБ. Важной концепцией ИБ является «защита в глубину» (Defense in Depth), то есть проникновении атакующего на один из защитных уровней, он может столкнуться с принципиально другой защитой каждого последующего уровня [18], [20].

Стандарт ISA/IEC 62443 является одним из основных методических документов по обеспечению кибербезопасности АСУ как в российской, так и в мировой практике разработки АСУ ТП, в том числе и АСУ ДД. Часть требований ISA/IEC 62443 также была перенесена в отечественный ГОСТ. Однако данный стандарт предполагает использование других нормативных документов по ИБ, указанных выше [21], [22].

Специфика обеспечения информационной безопасности для любой АСУ заключается в том,

Рис. 11. Жизненный цикл АСУ

что такие системы взаимодействуют с внешним миром и в случае утраты контроля над ними даже на короткое время, они могут привести к техногенным авариям с возможными человеческими жертвами и ущербом для экономики.

Использование принципов осуществления функциональной безопасности в автоматических транспортных системах должно способствовать внедрению современных стандартов ИБ за счет классификации и зонировании объектов АСУ, а также их полное включение в жизненный цикл с использованием «защиты в глубину» для предотвращения НСД и киберинцидентов.

Библиографический список

1. *Kristianssen A.*, *Andersson R.*, *Belin M.* Swedish Vision Zero policies for safety – A comparative policy contentanalysis. Saf. Sci. 2018.103. P. 260–269.

2. *Капский Д. В.*, *Кот Е. Н.* АСУ дорожным движением. Минск: БНТУ, 2014. С.31.

3. АСУДД: Эволюция «умных» светофоров. URL: https://habr.com/ru/post/125282/ (дата обращения: 12.01.2022).

4. *Данилин А. Н.*, *Никонов В. В.* О нейросетевом подходе к распознаванию дорожных ситуаций // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. № 12-1. С. 15–26.

5. «Swarco». URL: https://www.swarco.com/ru/produkty (дата обращения: 12.01.2022).

6. Микроконтроллер AT91RM9200 фирмы ATMEL. URL: http://www.gaw.ru/html. cgi/txt/publ/_ineltek/at91rm9200. htm (дата обращения: 12.01.2022).

7. «Электротекс». URL: https://asudd. pro/products/asudd/ (дата обращения: 12.01.2022).

8. «Элсистар». URL: http://elsystar.com/ (дата обращения: 12.01.2022).

9. «Телемеханика». URL: https://telemehanika.com/category/produkciya (дата обращения: 12.01.2022).

10. Техническое описание ДК УК-4.1М «Интелком». URL: https://goo.su/9Big (дата обращения: 12.01.2022).

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

12. ГОСТ Р 56461-2015. Безопасность транспортная. Общие требования.

13. ГОСТ Р 51624. Автоматизированные системы в защищенном исполнении.

14. ГОСТ Р 51583-2014. Порядок создания автоматизированных систем в защищенном исполнении.

15. ГОСТ IEC 61508-3-2018. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью.

16. ГОСТ Р МЭК 62443-2-1-2015. Сети коммуникационные промышленные. Защищенность (кибербезопасность) сети и системы.

17. *Ярушевский Д.* Обеспечение безопасности АСУ ТП – краткий обзор семейства стандартов iec 62443 // Информационная безопасность. 2014. № 3. С 34–36.

18. Информационная безопасность АСУ ТП: Дон Кихот в эру кибероружия. URL: https://habr.com/ru/post/316184/ (дата обращения: 15.01.2022).

19. *Лахно В. А.* Повышение кибербезопасности информационно-коммуникационных систем транспорта // Безпека інформації. 2016. Т. 22. № 1. С. 44–50.

20. *Каменских А. Н. Бортник Д. А.* Анализ рекомендаций по защите автоматизированных систем управления с целью выявления типичных уязвимостей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2016. № 17. С. 48–60.

21. *Синещук М. Ю.* Особенности обеспечения информационной безопасности АСУ ТП потенциально опасных объектов // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2015. № 1–2 (6). С. 49–51.

22. *Баранкова И. И.*, *Коновалов М. В.*, *Пермякова О. В.* Проектирование системы безопасности АСУ ТП как значимого объекта критической информационной инфраструктуры // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. 2019. № 1 (31). С. 31–36.

23. *Никулин С. А.*, *Хворов Р. А.* Методическое обеспечение безопасности информации в АСУ специального назначения // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2013. Т. 5. № 3. С. 34–40.

УДК 681.515.4 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-97-102**

И. И. Таболин*
аспирант
Р. Ю. Кузьменко*
аспирант
А. Д. Данилов*
доктор технических наук, профессор
**Воронежский государственный технический университет*

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МОДУЛЯ РЕГУЛЯТОРА ТОКА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТУРЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ БОРТОВОЙ СЕТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В данной статье приведена разработка математической модели модуля регулятора тока для аппаратуры регулирования и контроля. Спроектирована структура математической модели. Приведены результаты моделирования.
Ключевые слова: *система электроснабжения, аппаратура регулирования и контроля, система управления, математическая модель, ПИ-регулятор.*

I. I. Tabolin*
PhD Student
R. Y. Kuzmenko*
PhD Student
A. D. Danilov*
Dr. Sc. Tech., Professor
**Voronezh State Technical University*

THE DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE CURRENT REGULATOR MODULE IN REGULATION AND MONITORING EQUIPMENT CONTROL SYSTEM OF SPACECRAFT ONBOARD NETWORK

The article presented the development of a mathematical model of the current regulator module for regulation and monitoring equipment. The structure of the mathematical model is designed. The simulation results are presented.
Keywords: *power supply system, regulation and monitoring equipment, control system, mathematical model, PI controller.*

Введение

В настоящее время ведется разработка усовершенствованных систем электроснабжения (СЭС) для новых космических аппаратов (КА). Одной из таких СЭС является аппаратура регулирования и контроля (АРК), которая предназначена для обеспечения работоспособности КА и корректной обработки, передачи параметров его технических систем. АРК совместно с первичными источниками энергии – солнечными батареями (СБ), вторичными источниками энергии – аккумуляторными батареями (АБ) обеспечивает потребителей бортовой сети электрической энергией [1]–[3].

В состав данной СЭС входят такие функциональные узлы, как регуляторы тока СБ (РТ), зарядно-разрядные устройства АБ (ЗРУ), аппаратно-программный модуль АРК, стабилизатор напряжения (СН) и фильтр [4].

В данной работе приведено построение математической модуля РТ для разрабатываемой АРК.

Назначение регулятора тока

Система управления АРК, представляющая собой совокупность автоматических регуляторов напряжения и регуляторов тока с обратной связью, обеспечивает поддержание с заданными точностью и быстродействием выходного напряжения на шине 28,5 В и ограничение токов по заданным уставкам и командам от ботового компьютера. В системе организуется зонный принцип регулирования, который обеспечивает непрерывное изменение сигнала управления в

зависимости от энергобаланса системы и параметрических возмущений. Настройка контуров регулирования с заданными показателями качества осуществляется раздельно для каждого типа модулей РТ, ЗРУ и СН [5]–[6].

Модуль РТ в АРК обеспечивает непрерывное регулирование тока генератора СБ и автоматически включается в работу при подключении его ко входу СБ или имитатора СБ. Данный модуль выполнен в виде регулятора параллельного типа, работающего в режимах:

– передачи электроэнергии генератора СБ на шины СЭС;

– широтно-импульсного регулирования с частотой не менее 20 кГц;

– короткого замыкания генератора СБ.

Регулирование величин напряжения и токов осуществляется на основе принципа ПИ-регулирования с выработкой ШИМ-сигналов управления. Все ПИ-регуляторы являются полностью цифровыми, что позволяет поддерживать необходимую точность и стабильность в системе [4]–[6].

Построение математической модели модуля РТ

Математические модели сложных объектов и разрабатываемых устройств позволяют предварительно оценить правильность выбранных технических решений в виде схем, алгоритмов, их взаимосвязей, исследовать функционирование системы (переходные процессы) при воздействии возмущений (параметрических, внешних) и их комбинациях, оценить показатели качества процессов как в отдельных модулях, так и в системе в целом до экспериментальной отработки изделия, что сокращает число итераций, а, следовательно, издержки и время проектирования. За основу построения математических моделей взят метод передаточных функций динамических звеньев [7]. При этом для настройки регуляторов АРК приняты линеаризованные дискретные модели передаточных звеньев в виде функций дискретного Z-преобразования. Для синтеза регуляторов контура напряжения составлена эквивалентная схема объекта управления – фильтра и нагрузки для РТ (рис. 1).

Непрерывная передаточная функция объекта управления контура регулирования для РТ выглядит следующим образом:

$$K_{pm}(p) = K_{pwm} R_{\text{н}} K_{\text{оу}} \cdot \frac{R_{esr} p + 1}{(R_{esr} + R_{\text{н}}) p + 1}, \quad (1)$$

где K_{pwm} – коэффициент передачи цифрового ШИМ-модулятора.

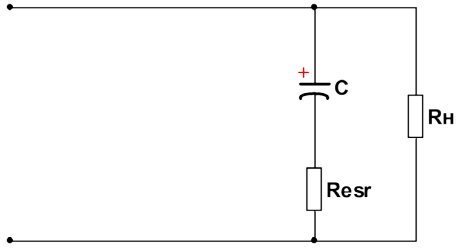


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема фильтра и нагрузки для РТ: $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки; C – суммарная емкость конденсаторов силового фильтра; R_{esr} – эквивалентное последовательное сопротивление конденсаторов фильтра

При наименьшей постоянной времени фильтра $\tau = R_{\text{н_мин}} \cdot C = 0{,}1 \cdot 0{,}042 = 4{,}2$ мс, и выбранном периоде дискретизации по напряжению $T_{\text{д_н}} = 300$ мкс, получаем соотношение $\tau / T_{\text{д_н}} = 14$, что вполне приемлемо для реализации системы без потери качества регулирования.

В результате расчетов численными методами были получены дискретные передаточные функции корректирующих звеньев РТ, пригодные для программной реализации на микропроцессорных устройствах. При этом для перевода непрерывных передаточных функций в дискретные использовалась математическая модель экстраполятора нулевого порядка ZOH (Zero-Order Hold) [7].

Расчет контуров управления АРК производился автоматизированным способом с использованием программы численного моделирования и анализа систем управления в системе MATLAB [8] и инструмента автоматизированного проектирования систем управления Control and Estimation Tools Manager (SISO Tools) [9].

Структура дискретного ПИ-регулятора контура напряжения представлена выражением:

$$K \cdot \frac{z + z_0}{z - 1}, \quad (2)$$

где K – коэффициент в числителе;

z_0 – нуль передаточной функции.

Разлагая выражение (2) на простые дроби, получаем коэффициенты ПИ-регулятора интегральной (3) и пропорциональной (4) составляющих:

$$K_{\text{и}} = K \cdot (1 + z_0), \quad (3)$$

$$K_{\text{п}} = \text{к}. \quad (4)$$

Структура ПИ-регулятора контура напряжения приведена на рис. 2.

Как видно из выражений (2) (3), регулятор в своей структуре содержит интегрирующее звено, сводящее к нулю статическую ошибку в установившемся режиме.

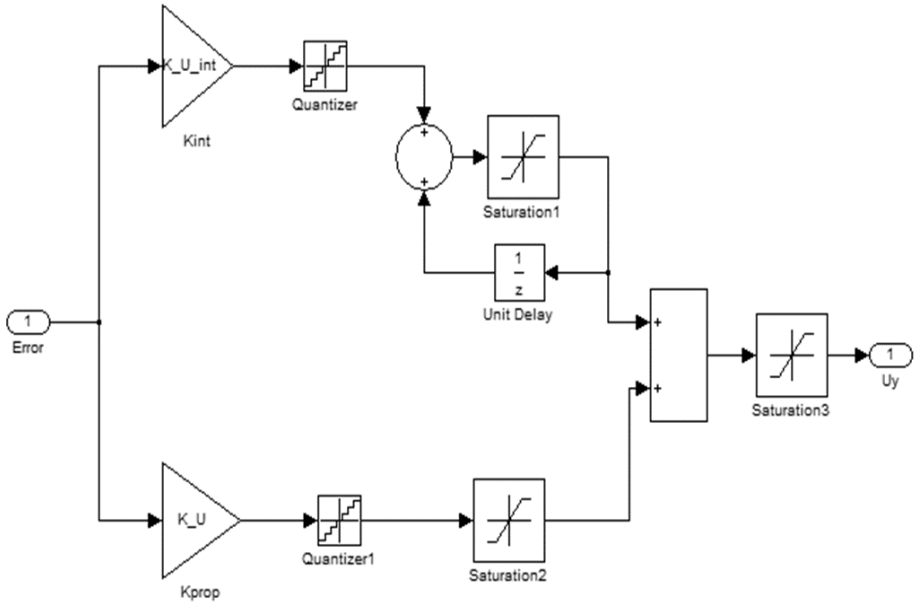


Рис. 2. Структура ПИ-регулятора контура напряжения

Для настраиваемого контура регулирования были заданы показатели качества переходного процесса при скачкообразном задании:

– время нарастания напряжения – 3 мс;
– время установления напряжения – 7 мс;
– перерегулирование по напряжению – 20 %;
– установившаяся ошибка по напряжению – 1 %;
– время нарастания тока – 0,3 мс;
– время установления тока – 2 мс;
– перерегулирование тока – 10 %;
– установившаяся ошибка по току – 1 %.

Структурная схема математической модели емкостного фильтра с учетом нагрузки приведена на рис. 3. Итоговая структура математической модели РТ представлена на рис. 4.

Результаты моделирования

Значение дискретной передаточной функции РТ в режиме нормального функционирования (то есть при номинальном токе):

$$H_{pm}(z)=\frac{0{,}0001156\cdot z+0{,}0006909}{z-0{,}9998}. \qquad (5)$$

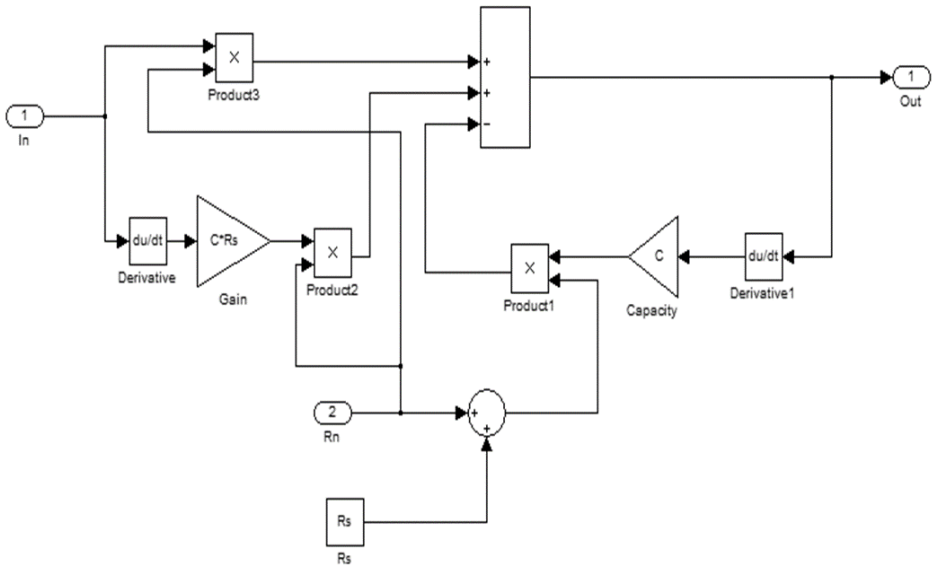


Рис. 3. Структурная схема математической модели емкостного фильтра

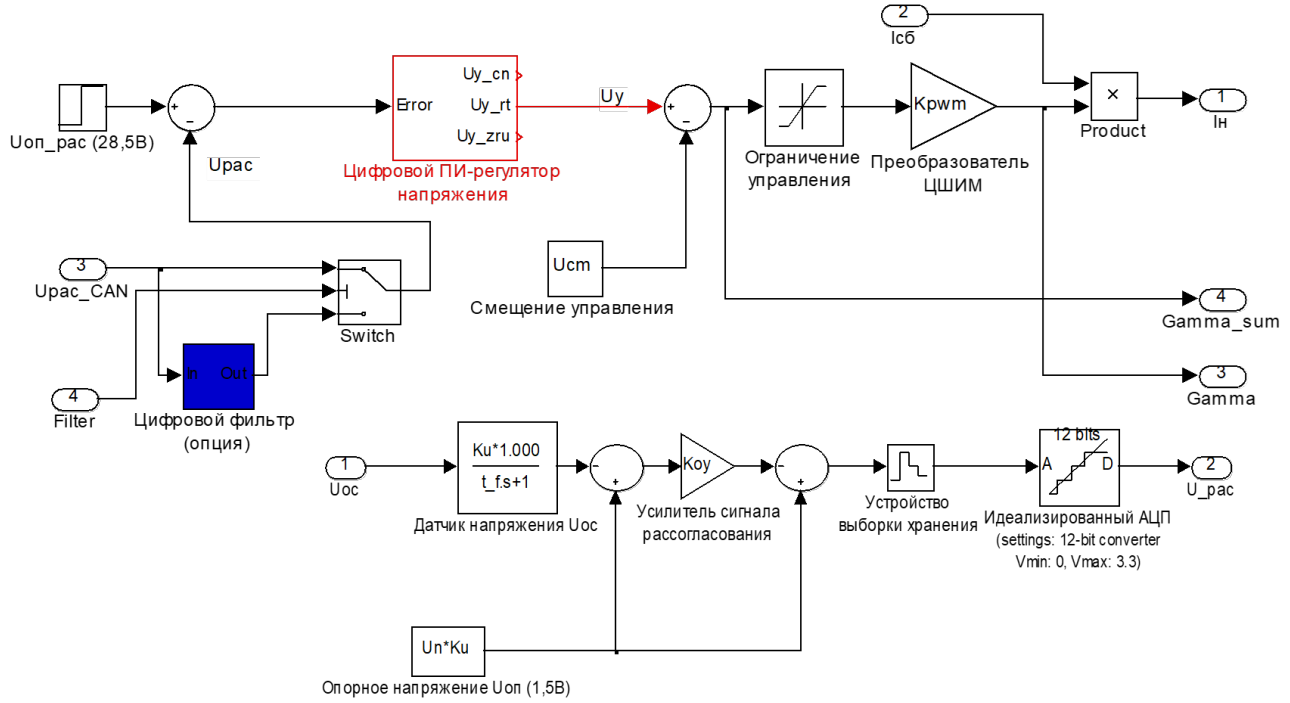


Рис. 4. Структура математической модели РТ

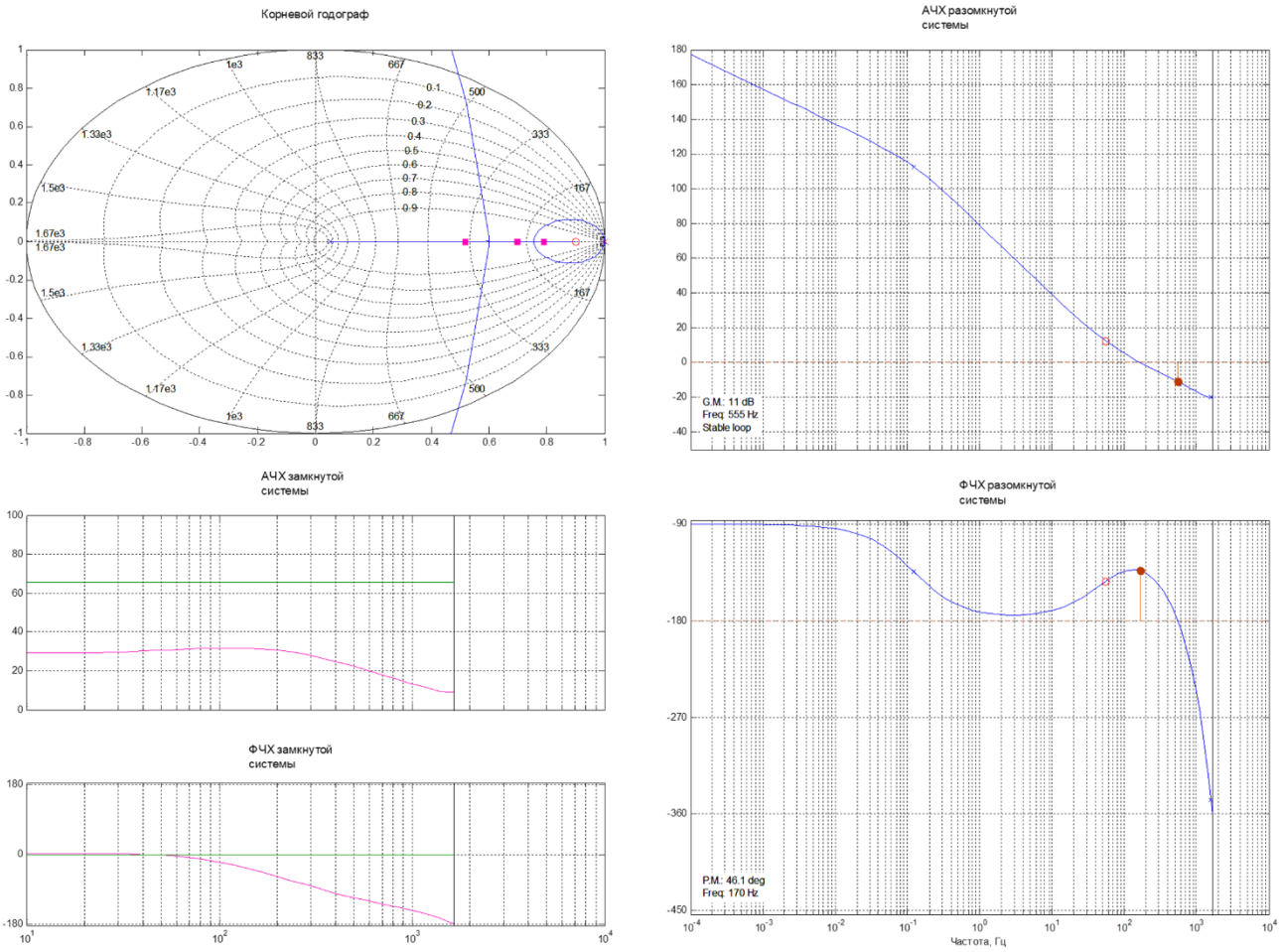


Рис. 5. Частотные характеристики системы регулирования РТ

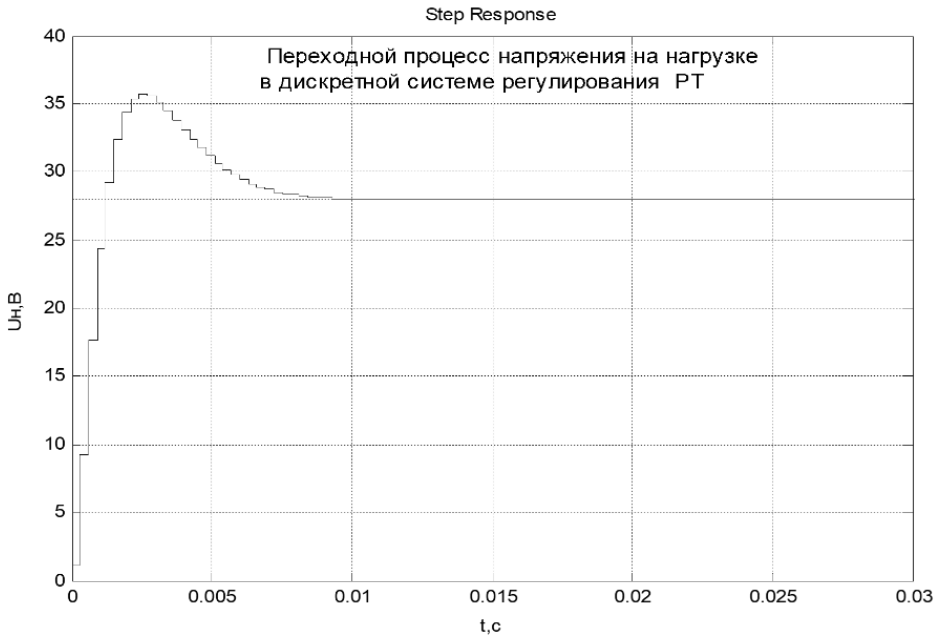


Рис. 6. Переходной процесс напряжения на нагрузке

Значение дискретной передаточной функции датчика напряжения с АЦП:

$$H_{\text{дн}}(z)=\frac{63{,}18}{z-0{,}4979}. \qquad (6)$$

С помощью инструмента SISO Tools рассчитаны необходимые значения коэффициентов цифрового ПИ-регулятора контура напряжения РТ.

Частотные характеристики системы регулирования РТ приведены на рис. 5. Запасы устойчивости по амплитуде и фазе соответственно равны ΔA=11 дБ и $\Delta\varphi$=46,1°.

На рис. 6 приведен переходной процесс напряжения на нагрузке при скачке задания $U_{\text{оп}}$=28,5 В.

Заключение

В ходе данной работы была спроектирована структура математической модели модуля РТ для АРК. В результате расчетов численными методами были получены дискретные передаточные функции корректирующих звеньев РТ, пригодные для программной реализации на микропроцессорных устройствах.

Особенностью проектируемой АРК является реализация алгоритмов регулирования с использованием цифрового способа управления на базе высокопроизводительных микроконтроллеров. Для нормального функционирования системы необходимо правильно выбрать частоты дискретизации (периоды семплирования) регулируемых координат. Практика показывает [10], что цифровая система удовлетворительно выполняет свои функции, если период дискретизации будет в 5–16 раз меньше наименьшей компенсируемой постоянной времени объекта управления. Другой не менее важной составляющей цифровой системы является шаг квантования по уровню. Обычно, учитывая требуемую статическую погрешность, разрядность АЦП 10–12 бит является вполне приемлемой для дискретизации по уровню регулируемых переменных.

Библиографический список

1. *Варенбуд Л. Р., Волокитин В. Н.* Инновационные решения при разработке аппаратуры регулирования и контроля систем энергоснабжения космических аппаратов // Энергия – XXI век. 2013. № 1 (84). С. 16–27.

2. *Савенков В. В., Тищенко А. К., Волокитин В. Н.* Принципы построения аппаратуры регулирования и контроля современных систем электроснабжения малоразмерных космических аппаратов // Решетневские чтения. Красноярск, 2017. Т. 1. С. 325–326.

3. *Савенков В. В., Тищенко А. К., Волокитин В. Н.* Аппаратура регулирования и контроля системы электропитания перспективного пилотируемого транспортного корабля // Решетневские чтения. Красноярск, 2018. Т. 1. С. 303–304.

4. *Таболин И. И., Данилов А. Д.* Разработка структуры аппаратуры регулирования и контроля системы энергоснабжения космического аппарата // Альтернативная и интеллектуальная энергетика: Мате-

риалы II Международ. научно-практ. конф., Воронеж, 16–18 сентября 2020 года. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2020. С. 216–217.

5. *Таболин И. И., Данилов А. Д.* Реализация зонного принципа работы аппаратуры регулирования и контроля бортовой энергосистемы космического аппарата // Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы VI Всероссийской (XXXIX Региональной) научно-технической 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.

6. *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.

7. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5 т. 2 изд. Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М., МГТУ им. Баумана, 2004. 616 с.

8. *Потемкин В. Г.* Система MATLAB: справочное пособие. М.: Диалог-МИФИ, 1997.350 с.

9. *Перельмутер В. М.* Пакеты расширения MATLAB. Control System Toolbox и Robust Control Toolbox. М.: Солон-Пресс, 2008. 222 с.

10. *Изерман Р.* Цифровые системы управления. М.: МЭИ, 2004. 400 с.

УДК 62-503 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-103-109**

В. Ф. Шишлаков*
доктор технических наук, профессор
В. И. Гончарова*
ассистент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗВЕНЬЕВ

В работе рассматриваются различные методы аппроксимации характеристик нелинейных систем автоматического управления с целью исследования точности работы системы. Рассчитываются параметры аппроксимаций, отличные от табличных значений. По найденным параметрам производится выбор оптимального метода аппроксимации.
Ключевые слова: *аппроксимация, нелинейные системы автоматического управления, линейная аппроксимация, квадратичная аппроксимация, кубическая аппроксимация, показательная аппроксимация, гиперболическая аппроксимация, аппроксимация степенной функции, логарифмическая аппроксимация, экспоненциальная аппроксимация.*

V. F. Shishlakov*
Dr. Sc. Tech., Professor
V. I. Goncharova*
Assistant
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS OF NONLINEAR LINKS

The paper discusses various methods for approximating the characteristics of nonlinear automatic control systems. Approximation parameters other than tabular values are calculated. Based on the parameters found, the optimal approximation method is selected.
Keywords: *approximation, nonlinear automatic control systems, linear approximation, quadratic approximation, cubic approximation, exponential approximation, hyperbolic approximation, power function approximation, logarithmic approximation, exponential approximation.*

Для решения задачи синтеза и анализа системы автоматического управления (САУ) необходимо построить адекватную математическую модель. В решении поставленной задачи нужно правильно идеализировать параметры синтезируемой системы. Важно учесть, что при построении математической модели должны сохраняться основные характерные черты и свойства исследуемой САУ, в то же время идеализация системы состоит в необходимости пренебречь второстепенными факторами, которые мало влияют на правильность работы САУ. Отсюда следует, что при построении математических моделей систем, которые содержат элементы с нелинейными характеристиками, зачастую стремятся упростить реальные характеристики и аппроксимировать их.

Существуют различные подходы и методы аппроксимации. Наиболее часто применяется кусочно-линейная аппроксимация, поскольку обладает наибольшей универсальностью, а также полиномиальная, аппроксимация методом Лагранжа и др. [1], [2], [4], [5].

В работе рассмотрены линейная, квадратичная, кубическая, показательная, гиперболическая, степенная, логарифмическая и экспоненциальные методы аппроксимации [6].

Необходимо найти функцию заданного вида (линейную, квадратичную и т. д.) $y=F(x)$, принимающую в заданных точках наиболее близкие к реальным (полученных экспериментально) значениям. В результате получаем аппроксимирующее выражение для нелинейной статической характеристики, которая дает возможность построить соответствующую математическую модель.

Для получения параметров аппроксимирующей функции используем метод наименьших квадратов. Таким образом, в каждом случае требуется найти функцию F, такую, чтобы сумма квадратов S была наименьшей [6]:

$$S = \sum_i (y_i - F(x_i))^2 \to \min. \qquad (1)$$

Так, например, в случае линейной аппроксимации $F=ax+b$, выражение (1) является функцией двух переменных a и b. Чтобы найти ее минимум,

необходимо использовать условие экстремума, а именно равенство нулю частных производных.

В этом случае получаем

$$\begin{cases}\sum[y_i - F(x_i,a,b)]\cdot F'_a(x_i,a,b)=0\\ \sum[y_i - F(x_i,a,b)]\cdot F'_b(x_i,a,b)=0\end{cases},$$

где

$$F'_a = x,$$
$$F'_b = 1$$

В результате

$$\begin{cases}\sum(y_i - ax_i - b)\cdot x_i = 0\\ \sum(y_i - ax_i - b)=0\end{cases}$$

Следовательно,

$$\begin{cases}\sum y_i x_i - a\sum x_i^2 - b\sum x_i = 0\\ \sum y_i - a\sum x_i - nb = 0\end{cases}$$

И окончательно имеем

$$a = \frac{\sum x_i \sum y_i - n\sum x_i y_i}{\left(\sum x_i\right)^2 - n\sum x_i^2} \quad (2)$$

$$b = \frac{\sum x_i \sum x_i y_i - \sum x_i^2 \sum y_i}{\left(\sum x_i\right)^2 - n\sum x_i^2} \quad (3)$$

Аналогично рассмотренному выше были получены соотношения для коэффициентов аппроксимирующих функций:

квадратичной

$$\hat{y} = ax^2 + bx + c.$$

С помощью метода Крамера найдены коэффициенты a, b, c

$$\begin{cases}a\sum x_i^2 + b\sum x_i + nc = \sum y_i,\\ a\sum x_i^3 + b\sum x_i^2 + c\sum x_i = \sum x_i y_i,\\ a\sum x_i^4 + b\sum x_i^3 + c\sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i;\end{cases} \quad (4)$$

кубической

$$\hat{y} = ax^3 + bx^2 + cx + d.$$

С помощью метода Крамера найдены коэффициенты a, b, c, d

$$\begin{cases}a\sum x_i^2 + b\sum x_i + nc = \sum y_i,\\ a\sum x_i^3 + b\sum x_i^2 + c\sum x_i = \sum x_i y_i,\\ a\sum x_i^4 + b\sum x_i^3 + c\sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i;\end{cases} \quad (5)$$

степенной

$$\hat{y} = a\cdot x^b$$

$$b = \frac{n\sum(\ln x_i \cdot \ln y_i) - \sum \ln x_i \cdot \sum \ln y_i}{m\sum \ln^2 x_i \cdot \left(\sum \ln x_i\right)^2} \quad (6)$$

$$a = \exp\left(\frac{1}{n}\sum \ln y_i - \frac{b}{n}\sum \ln x_i\right) \quad (7)$$

показательной

$$\hat{y} = a\cdot b^x$$

$$b = \exp\frac{n\sum x_i \ln y_i - \sum x_i \cdot \sum \ln y_i}{n\sum x_i^2 - \left(\sum x_i\right)^2} \quad (8)$$

$$a = \exp\left(\frac{1}{n}\sum \ln y_i - \frac{\ln b}{n}\sum \ln x_i\right) \quad (9)$$

логарифмической

$$\hat{y} = a + b\ln x$$

$$b = \exp\frac{n\sum(y_i \ln x_i) - \sum \ln x_i \cdot \sum y_i}{n\sum x_i^2 - \left(\sum x_i\right)^2} \quad (10)$$

$$a = \frac{1}{n}\sum y_i - \frac{b}{n}\sum \ln x_i \quad (11)$$

гиперболической

$$\hat{y} = a + \frac{b}{x}$$

$$b = \frac{n\sum \frac{y_i}{x_i} - \sum \frac{1}{x_i}\sum y_i}{n\sum \frac{1}{x_i^2} - \left(\sum \frac{1}{x_i}\right)^2} \quad (12)$$

$$a = \frac{1}{n}\sum y_i - \frac{b}{n}\sum \frac{1}{x_i} \quad (13)$$

экспоненциальной

$$\hat{y} = e^{a+bx}$$

$$b = \frac{n\sum x_i \ln y_i - \sum x_i \cdot \sum \ln y_i}{n\sum x_i^2 - \left(\sum x_i\right)^2} \quad (14)$$

$$a = \frac{1}{n}\sum \ln y_i - \frac{b}{n}\sum x_i, \quad (15)$$

где a, b, c, d – коэффициенты аппроксимации; n – количество точек статической характеристики; x_i – координаты x точек статической ха-

рактеристики; y_i – координаты y точек статической характеристики; $\hat{y}_i$ – аппроксимированные значения y_i.

Необходимо дать оценку степени приближения аппроксимирующей функции к реальным статическим характеристикам нелинейного звена, что можно сделать по результатам вычисления средней ошибки аппроксимации. Таким образом, определяется какой из методов наиболее точно аппроксимирует статическую характеристику системы [1]–[4].

В качестве критерия близости аппроксимирующей функции к заданной функции используются суммы квадратов разностей табличных значений y и теоретических, рассчитанных по уравнениям (2–15).

В качестве объекта исследования была взята механическая характеристика однофазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и экранированными полюсами ДКЭ-1,6–3 [7], показанная на рис. 1, для каждого вида аппроксимации представлены значения коэффициентов a, b, c и d по формулам (2–15) в табл. 1.

Целесообразно определить оптимальное количество точек, задающих статическую характеристику. На рис. 1–8 показаны различные виды аппроксимации при n=3, 6 и 10. При этом расчетная координата x соответствует ω (скорость вращения вала двигателя), а y соответствует M (момент). Как следует из рис. 1–8, при определении коэффициентов (2–15), по 6 или 10 точкам, математическая модель нелинейного элемента дает достаточный для практического использования результат аппроксимации.

Кубическая аппроксимация при n=3 ошибочна, в этом случает минимально возможное количество точек n=6.

По полученным выражениям построены графики аппроксимаций (рис. 9).

Аппроксимировав статическую характеристику двигателя, были получены средние значения ошибки аппроксимации с использованием выражения (16), которые сведены в табл. 2.

$$\bar{A} = \frac{1}{n}\sum\left|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right| \cdot 100\%, \qquad (16)$$

Из табл. 2 видно, что средняя ошибка аппроксимации для двигателя ДКЭ-1,6–3 меньше при кубической аппроксимации и составляет 0,4357 %.

Рассмотренный в работе подход может быть использован для различных по виду характеристик нелинейных элементов, для построения математических моделей, адекватно воспроизводящих основы физики функционирования систем управления различных классов.

Таблица 1

Коэффициенты аппроксимации двигателя ДКЭ-1,6–3 при десяти точках

	a	*b*	*c*	*d*
Линейная аппроксимация	–6.0807	3050.0340	–	–
Квадратичная аппроксимация	–0.0362	–0.0850	2855.1135	–
Кубическая аппроксимация	–0.0003	0.0296	–4.5214	2935.3955
Аппроксимация степенной функцией	4745.8833	–0.1465	–	–
Показательная аппроксимация	3102.1976	0. 9976	–	–
Логарифмическая аппроксимация	4123.8061	–368.3403	–	–
Гиперболическая аппроксимация	2314.8815	14136.8898	–	–
Экспоненциальная аппроксимация	8.0399	–0.0024	–	–

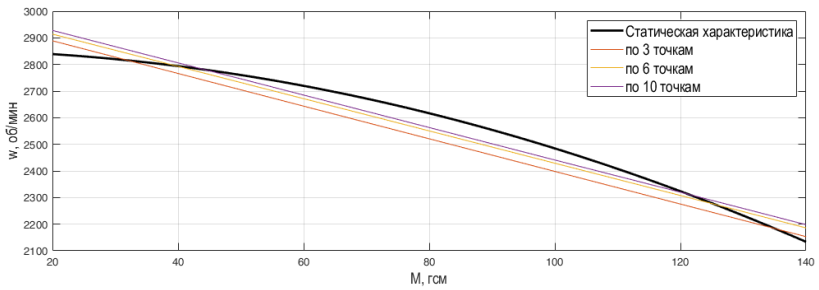


Рис. 1. Линейная аппроксимация при различном количестве точек

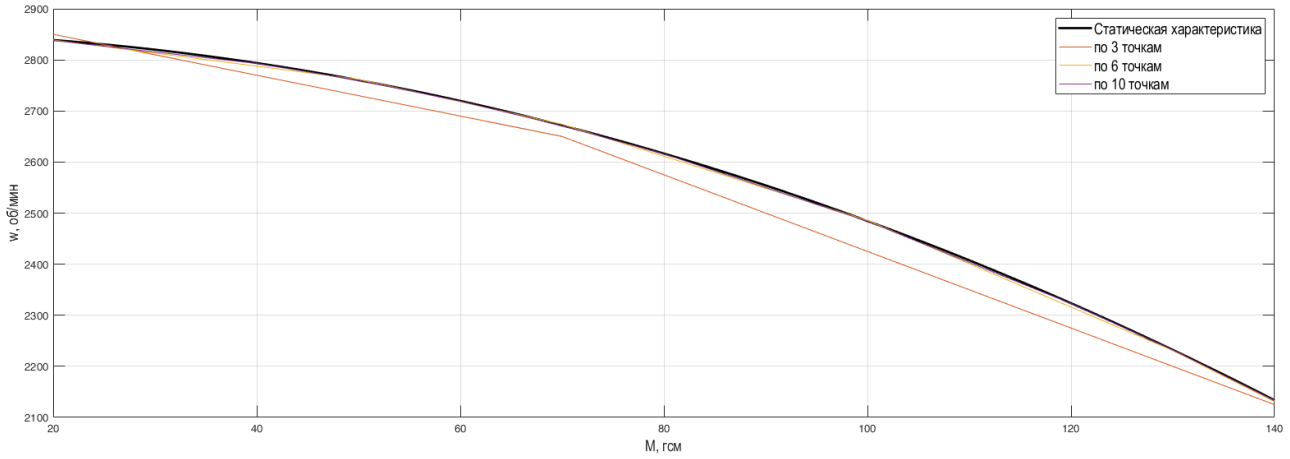


Рис. 2. Квадратичная аппроксимация при различном количестве точек

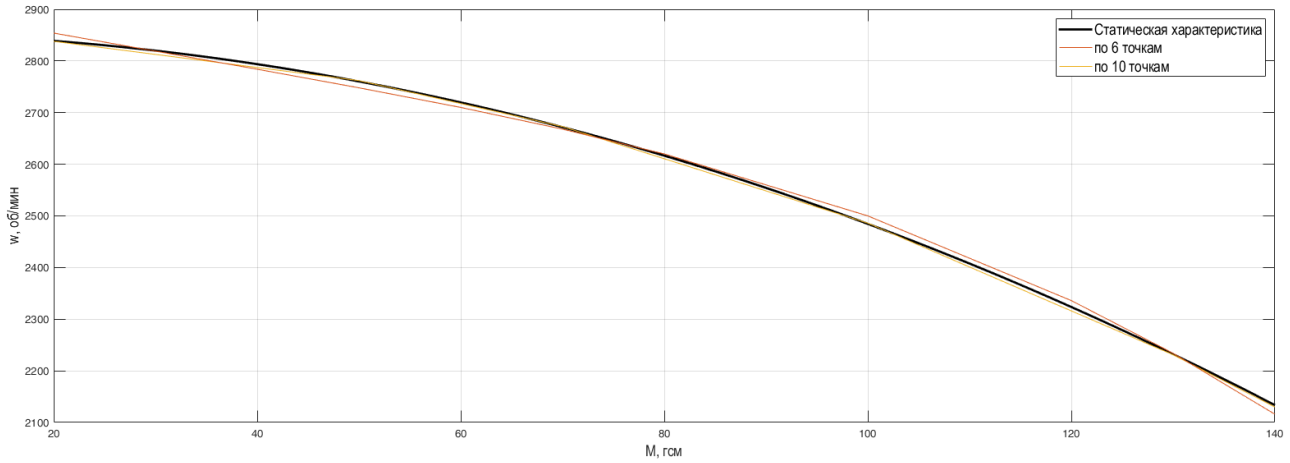


Рис. 3. Кубическая аппроксимация при различном количестве точек

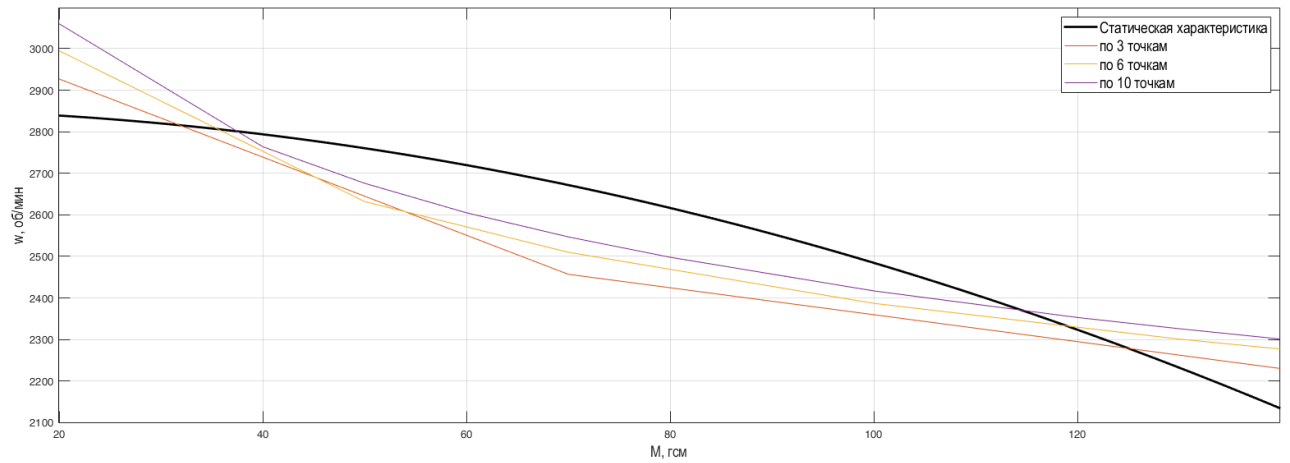


Рис. 4. Степенная аппроксимация при различном количестве точек

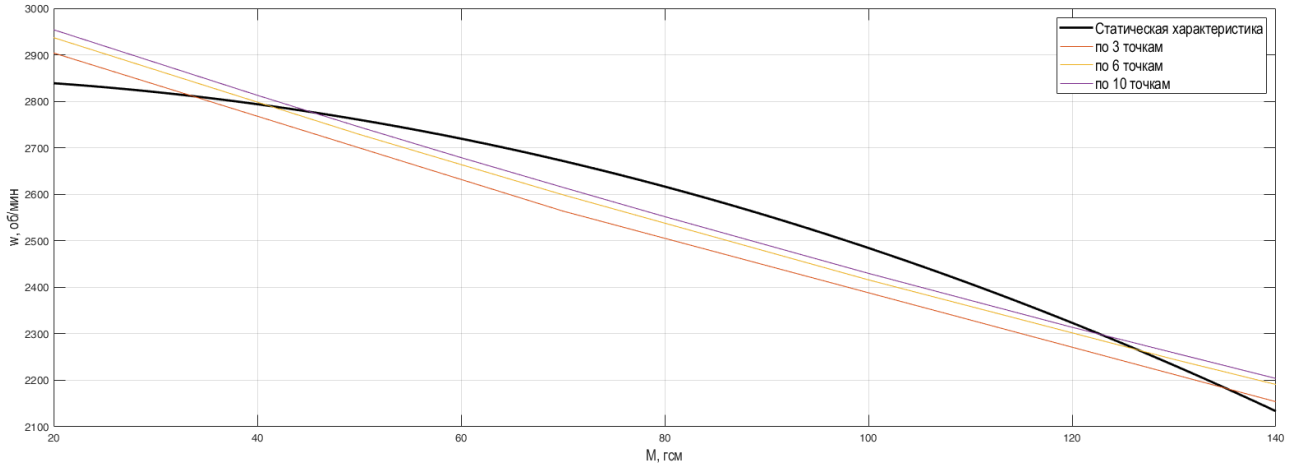


Рис. 5. Показательная аппроксимация при различном количестве точек

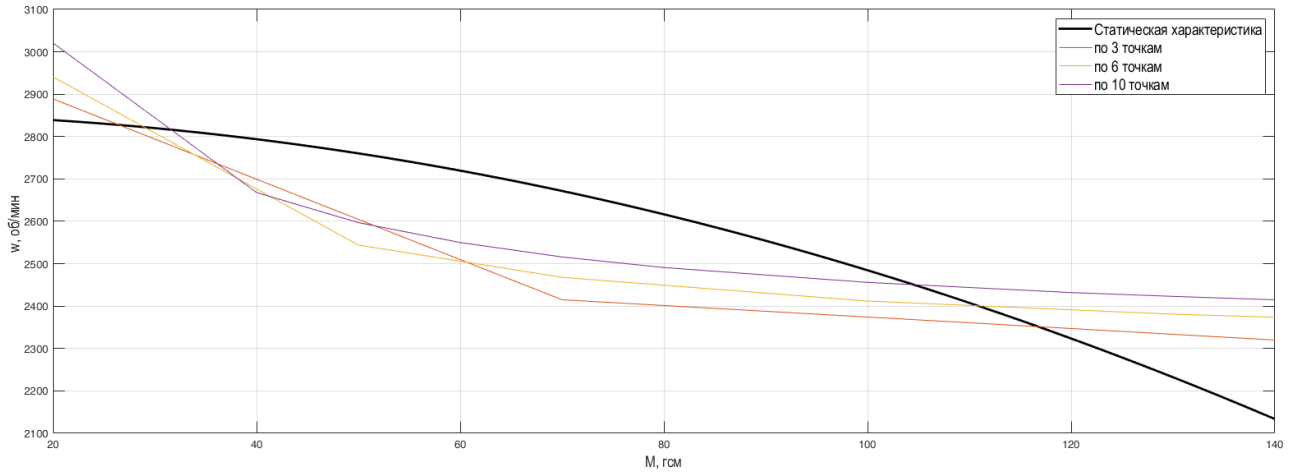


Рис. 6. Гиперболическая аппроксимация при различном количестве точек

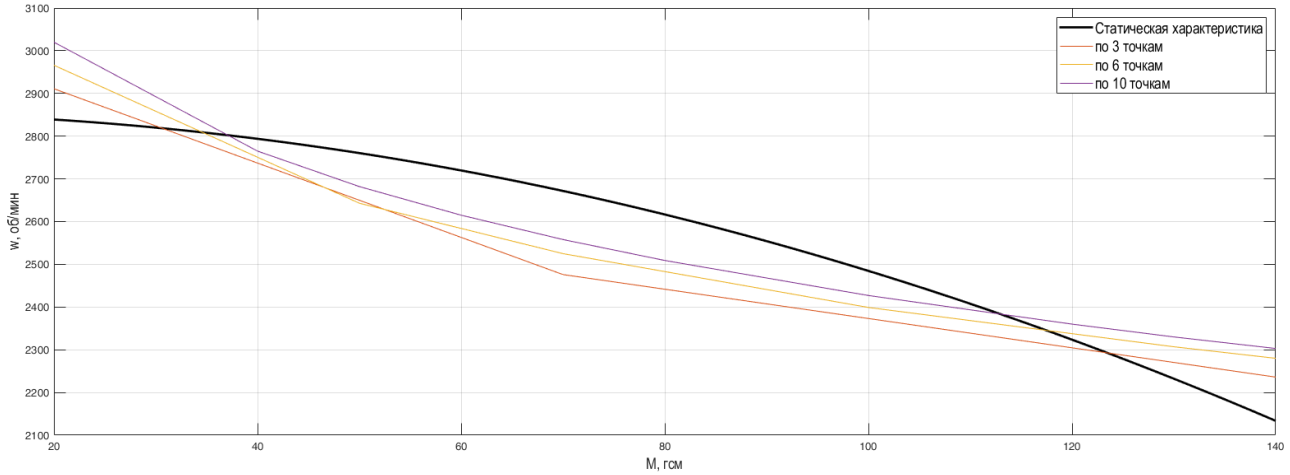


Рис. 7. Логарифмическая аппроксимация при различном количестве точек

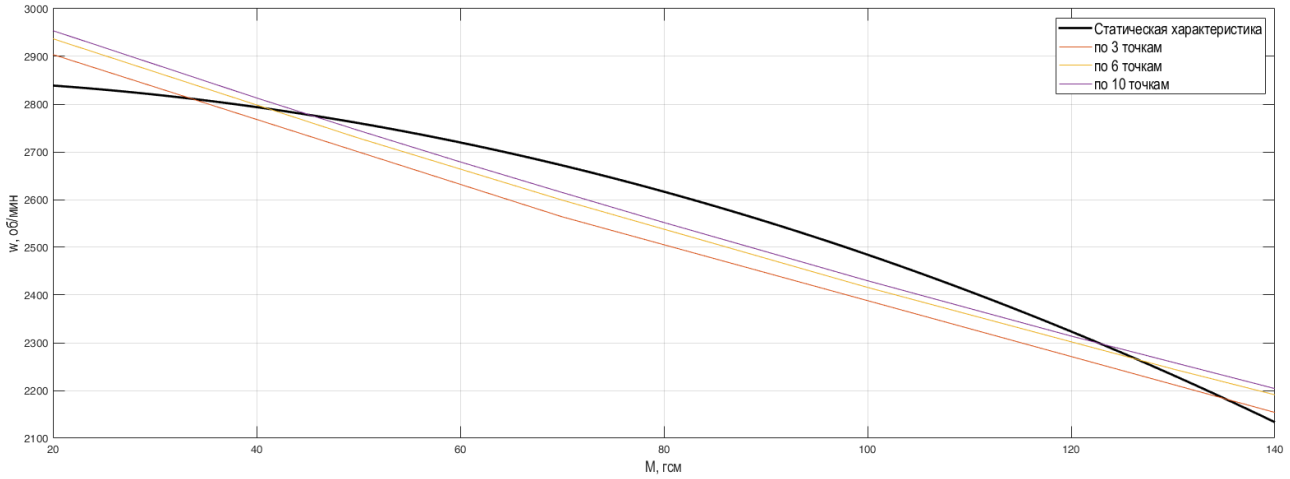


Рис. 8. Экспоненциальная аппроксимация при различном количестве точек

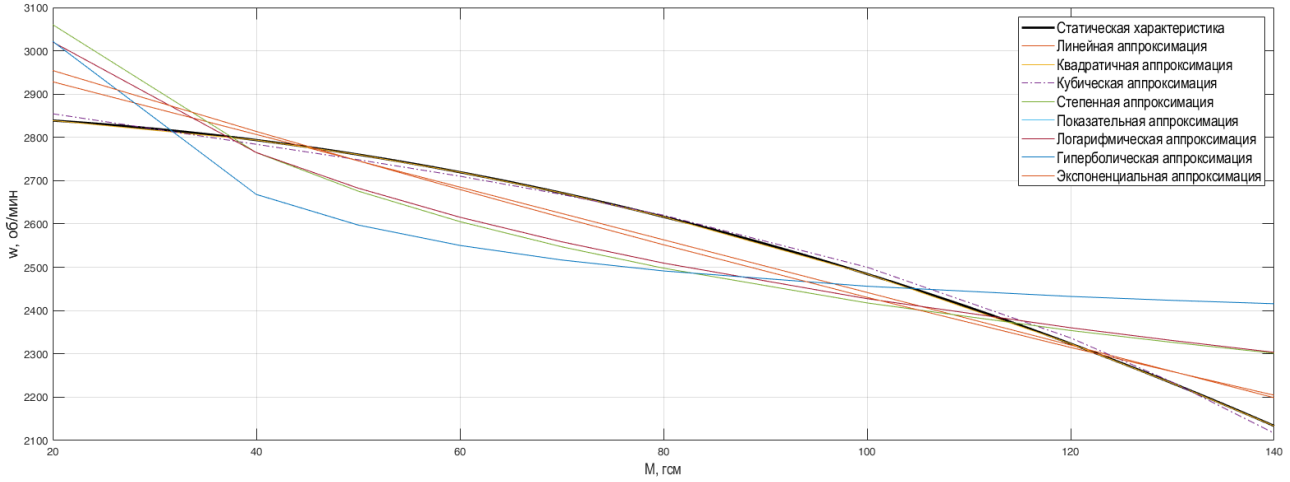


Рис. 9. Различные виды аппроксимации

Таблица 2

Средние ошибки аппроксимации двигателя ДКЭ-1,6–3

	$\bar{A}$ (средняя ошибка аппроксимации), %
Линейная аппроксимация	1.5506
Квадратичная аппроксимация	0.5248
Кубическая аппроксимация	0.4357
Аппроксимация степенной функцией	4.1898
Показательная аппроксимация	1.8596
Логарифмическая аппроксимация	3. 9164
Гиперболическая аппроксимация	6.1883
Экспоненциальная аппроксимация	1.8596

Библиографический список

1. *Бесекерский В. А., Попов Е. П.* Теория автоматического управления. 4-е изд. перераб. и доп. СПб.: Профессия, 2003.752 с.

2. *Никитин А. В., Шишлаков В. Ф.* Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: монография / Под. ред. В. Ф. Шишлакова. СПб: ГУАП, 2003.

3. *Фельдбаум А. А.* Введение в теорию нелинейных цепей. М.: Энергоиздат, 1948. 324 с.

4. *Goncharova V.* Overview of approximation methods. Bulletin of the UNESCO department «Distance education in engineering» of SUAI: Collection of the papers St. Petersburg Issue 6. SPb.: SUAI, 2021. P. 51–56.

5. *Шишлаков В. Ф., Ватаева Е. Ю., Решетникова Н. В.* Синтез параметров САУ при полиномиальной аппроксимации нелинейных характеристик // Инновации в науке и практике: сб. статей по материалам VII международ. научно-практ. конф. В 5 ч. 2018. С. 92–98.

6. *Голованчиков А. Б., Доан М. К., Петрухин А. В.* Сравнение точности аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших относительных квадратов с методом наименьших квадратов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8. № 1 (28). С. 38–39.

7. Reference manual. ДКЭ-1,6-3, ТУ 16.510.412–73.

УДК 621.38 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-110-119**

Д. О. Якимовский*
кандидат технических наук, доцент
И. Г. Криволапчук*
старший преподаватель
Т. Г. Полякова*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

О МОДЕЛИРОВАНИИ ШИРОТНО-ИСПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СРЕДЕ NI MULTISIM™

Рассмотрены модели, алгоритмы работы и особенности моделирования широтно-импульсных преобразователей и устройств на их основе в среде NI Multisim™. Приведены примеры моделей для изучения внутреннего устройства преобразователей.
Ключевые слова: *широтно-импульсная модуляция, преобразование сигналов, моделирование, обучение.*

D. O. Yakimovsky*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
I. G. Krivolapchuk*
Senior Lecturer
T. G. Polyakova*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

PWM CONVERTERS SIMULATION WITH NI MULTISIM™ ENVIRONMENT

The article describes some aspects of simulation of pulse-with modulation converters. Examples of models for studying the internal structure of the converters are considered.
Keywords: *pulse-with modulation, spice model, simulation, education.*

В силовой электронике и микропроцессорной технике широкое распространение получила широтно-импульсная модуляция (ШИМ, в англоязычной литературе обозначается аббревиатурой PWM – pulse-width modulation) – способ управления мощностью, при котором подключение и отключение потребителя энергии происходит дискретно. Благодаря высокому коэффициенту полезного действия схемы ШИМ являются неотъемлемой частью выходных ключевых каскадов современных систем управления. Существует два основных типа ШИМ: аналоговые и цифровые. Электронная промышленность предлагает широкий выбор специализированных микросхем аналоговых ШИМ-контроллеров, предназначенных для использования в различных областях электроники. Цифровые ШИМ, как правило, входят в состав периферийных модулей микроконтроллеров, но могут быть представлены и в виде отдельных функциональных модулей.

Для грамотного использования таких устройств специалисты в области проектирования и эксплуатации электронных систем управления должны обладать знаниями не только о процессах преобразования сигнала, но и об аппаратных средствах, это преобразование реализующих. Серьезную помощь в приобретении этих знаний может оказать моделирование схем с использованием специализированных пакетов. Одним из наиболее совершенных пакетов моделирования гибридных электронных схем, получивший широкое распространение в академической среде, является пакет NI Multisim™ [1], поддерживаемый и развиваемый фирмой National Instruments. Одним из существенных отличий Multisim от аналогичных продуктов – наличие режима интерактивного моделирования, позволяющего непосредственно наблюдать процессы в моделируемом устройстве и взаимодействовать со схемой. Такая возможность является очень полезной, в частности, при изучении внутреннего устройства ШИМ.

Библиотека компонентов Multisim [2] содержит ряд моделей различной сложности, позволяющих строить схемы с использованием ШИМ. Так, рис. 1 представляет базовый ШИМ-преобразователь (Master Database/Power/POW-

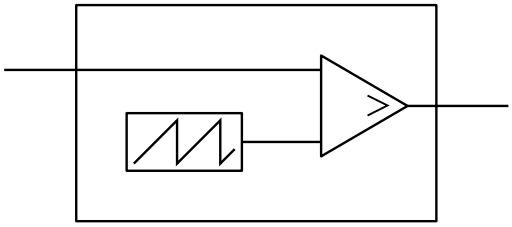


Рис. 1. Базовый ШИМ-контроллер

ER_CONTROLLERS/PWM), позволяющий также увидеть функциональные узлы преобразователя – источник линейно-нарастающего (пилообразного) напряжения и компаратор.

Наличие подобных компонентов существенно упрощает разработку сложных схем, уменьшая количество элементов на листе, но предполагает достаточно глубокое понимание разработчиком функционирования узлов, скрытых за макромоделями. Для выработки такого понимания необходимо изучение внутреннего устройства с использованием развернутых схем и в идеальном варианте параллельное изучение модели и аппаратной реализации. Ниже будут рассмотрены примеры Multisim-моделей, дающие возможность изучить работу ШИМ-преобразователей «изнутри» и легко реализуемые в виде макетов.

Рассмотрим схему аналогового ШИМ, в задачу которого входит преобразование аналогового напряжения в импульсный сигнал. Как и упомянутый выше библиотечный компонент, преобразователь включает в себя аналоговый компаратор напряжения и генератор пилообразного напряжения. Схема аналогового ШИМ приведена на рис. 2.

В качестве генератора линейно-изменяющегося напряжения используется схема релаксационного генератора на основе операционного усилителя (ОУ) U1 [3], [4]. Обычно данная схема применяется как источник прямоугольных импульсов (мультивибратор). Если же в качестве выходного сигнала использовать напряжение на конденсаторе, то при определенных ограничениях получается простой генератор напряжения треугольной формы (рис. 3). Элементы C1, R1, R2, R3 задают период колебаний и амплитуду напряжения на конденсаторе C1. При построении схемы могут быть использованы как модели реальных операционных усилителей, так и упрощенные идеальные компоненты, как сделано в рассматриваемой схеме. В последнем случае следует учитывать, что запуск схемы происходит благодаря неидеальности ОУ, выражающейся в наличии напряжений и токов смещения на входах, поэтому необходимо соответствующим образом задать параметры ОУ.

Период генерируемого сигнала в значительной мере определяется постоянной времени цепи C1R1. Для повышения линейности изменения напряжения следует использовать начальный

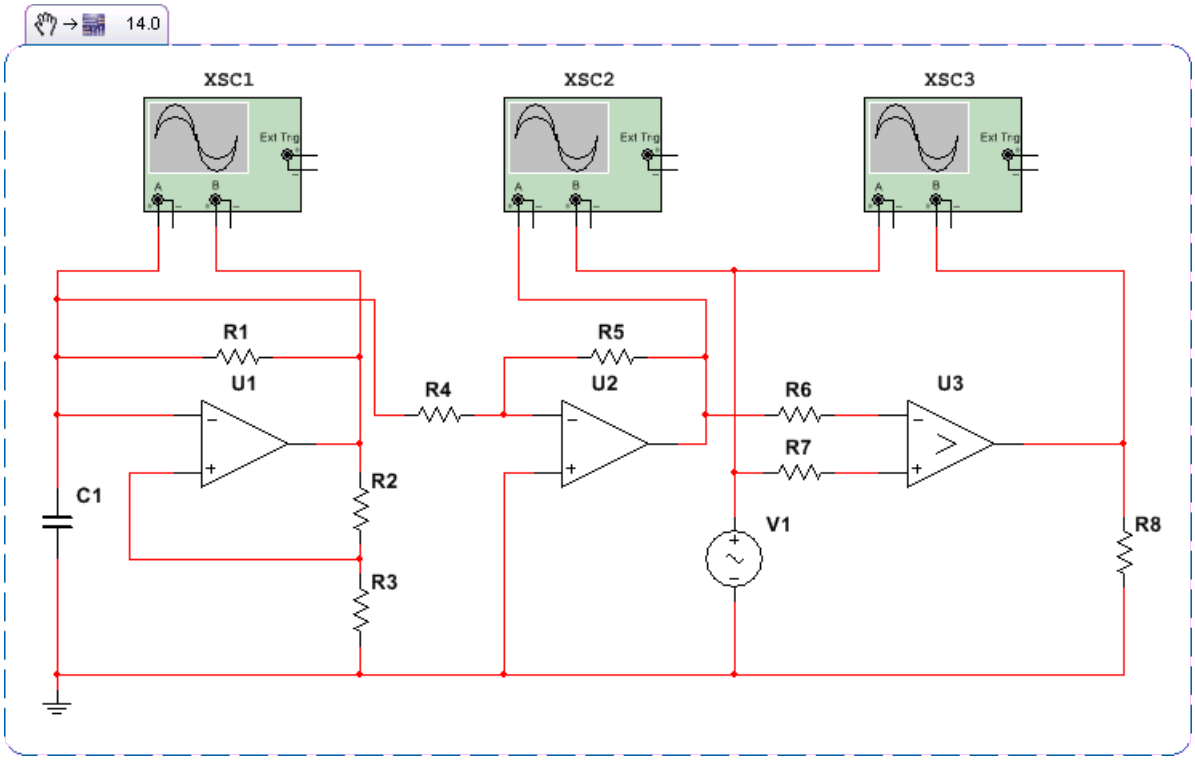


Рис. 2. Модель аналогового ШИМ

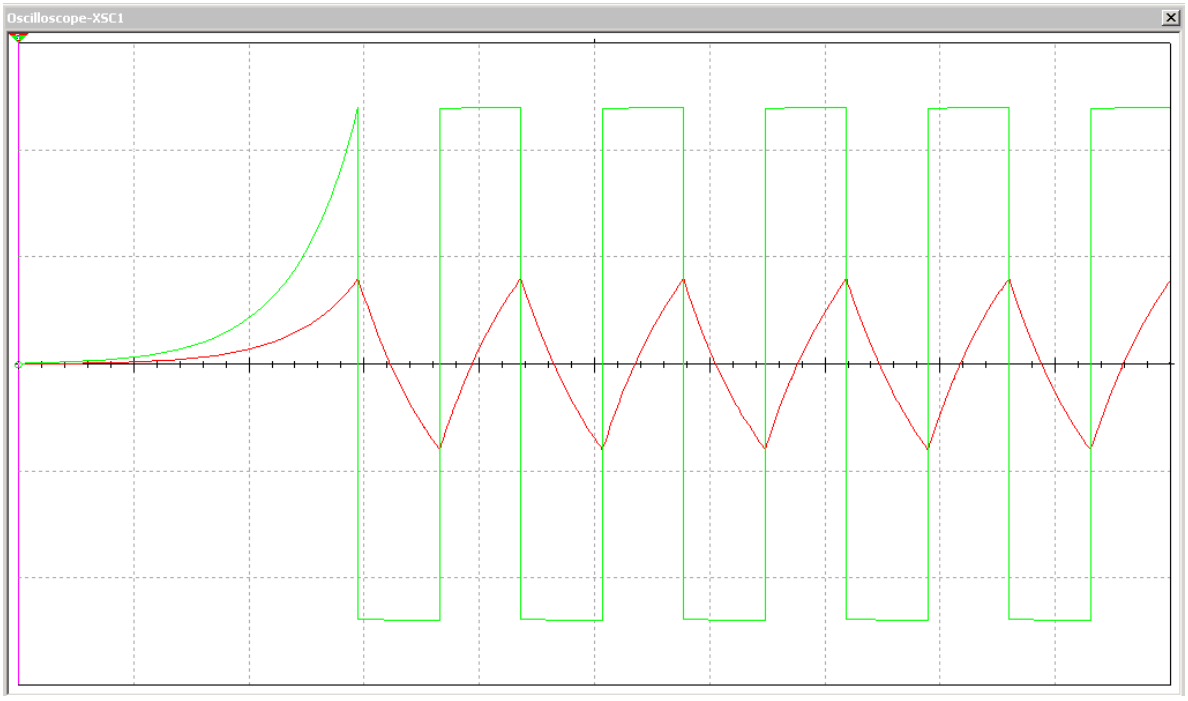


Рис. 3. Генерация напряжения треугольной формы (XSC1)

участок заряда (разряда) конденсатора C1 длительностью не более 20–30 % от величины постоянной времени. При таком ограничении может потребоваться дополнительный усилитель для получения необходимой амплитуды колебаний. В рассматриваемом примере усилитель собран на элементах U2, R4 и R5. Этот же усилитель может использоваться для позиционирования сигнала генератора относительно нулевого уровня, для этого в него нужно добавить цепь смещения.

В качестве источника аналогового сигнала для ШИМ применен генератор синусоидального напряжения V1. Осциллограммы входного и опорного сигналов показаны на рис. 4.

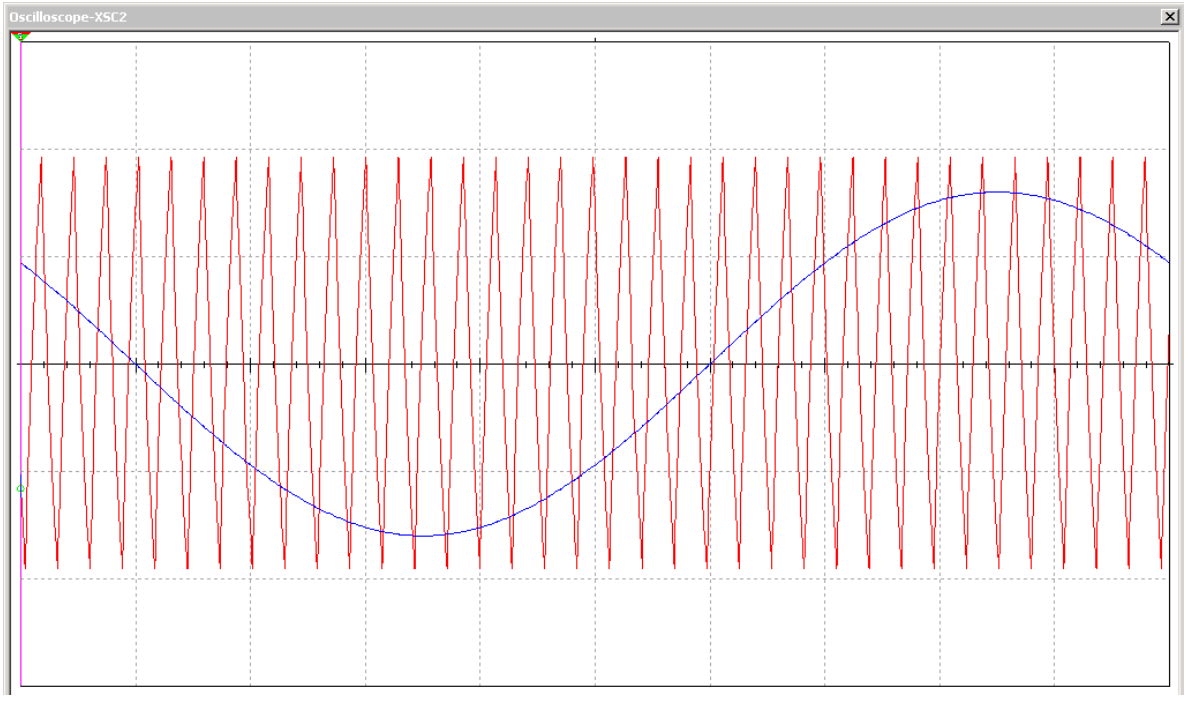


Рис. 4. Сигналы на входах компаратора (XSC2)

Входной аналоговый сигнал поступает на неинвертирующий вход компаратора U3, пилообразное напряжение – на инвертирующий. Сопротивление R8 выступает в качестве нагрузки выхода компаратора. В течение времени, когда напряжение аналогового синусоидального сигнала больше пилообразного напряжения, на выходе компаратора формируется напряжение, соответствующее логической «1», в нашем случае – 5В, в остальное время на выходе присутствует логический «0», имеющий в общем случае значение, отличное от 0В (рис. 5).

Выходной сигнал ШИМ может быть далее использован для управления ключевыми каскадами усилителя мощности. В случае непосредственного использования может потребоваться компенсация постоянной составляющей, вызванной неидеальностью выходного каскада компаратора.

Особенностью рассмотренного выше генератора треугольного напряжения является возможность построения ШИМ без использования дополнительного компаратора. При более внимательном изучении схемы можно увидеть, что компаратор уже имеется в распоряжении – это операционный усилитель U1, фактически сравнивающий напряжения на своих входах, формируя выходные прямоугольные импульсы равной длительности для обеих полярностей. Подавая на неинвертирующий вход ОУ дополнительное смещение, можно пропорционально изменять длительность полупериодов, получая, таким образом, широтно-модулированный сигнал. Подобный ШИМ будет иметь сравнительно узкий рабочий диапазон, но в некоторых случаях можно существенно упростить схему преобразователя.

Как уже было ранее указано, рассмотренная схема имеет существенные недостатки формирователя опорного напряжения: заметная нелинейность формируемого сигнала и жесткая связь временных и амплитудных параметров. Значительно лучшие результаты дает схема формирователя, показанная на рис. 6. Здесь генератор линейно-изменяющегося напряжения (ЛИН) строится на основе интегрирующего усилителя, закольцованного с триггером Шмитта. Интегратор собран на операционном усилителе U1 и элементах R1 и C1, определяющих его временные характеристики. Триггер Шмитта (переключатель с гистерезисом) реализован на ОУ U2 и резисторах R2 и R3, определяющих амплитуду выходного сигнала. Резисторы могут быть заменены потенциометром для плавной регулировки амплитуды.

Как видно из рис. 7, данный формирователь обладает существенно лучшей линейностью выходного напряжения. При необходимости он может быть легко преобразован в генератор пилообразного напряжения добавлением альтернативной времязадающей цепи.

В состав ШИМ-контроллера обычно входит усилитель рассогласования (ошибки) для орга-

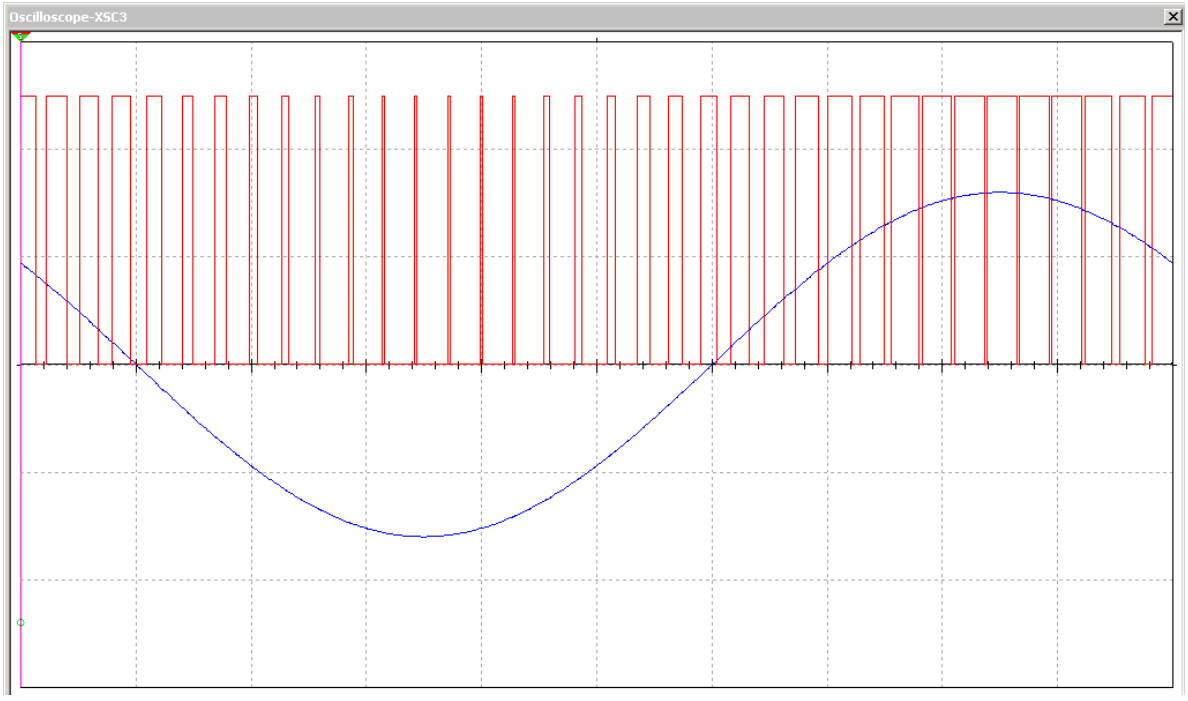


Рис. 5. Входной аналоговый и выходной импульсный сигналы ШИМ (XSC3)

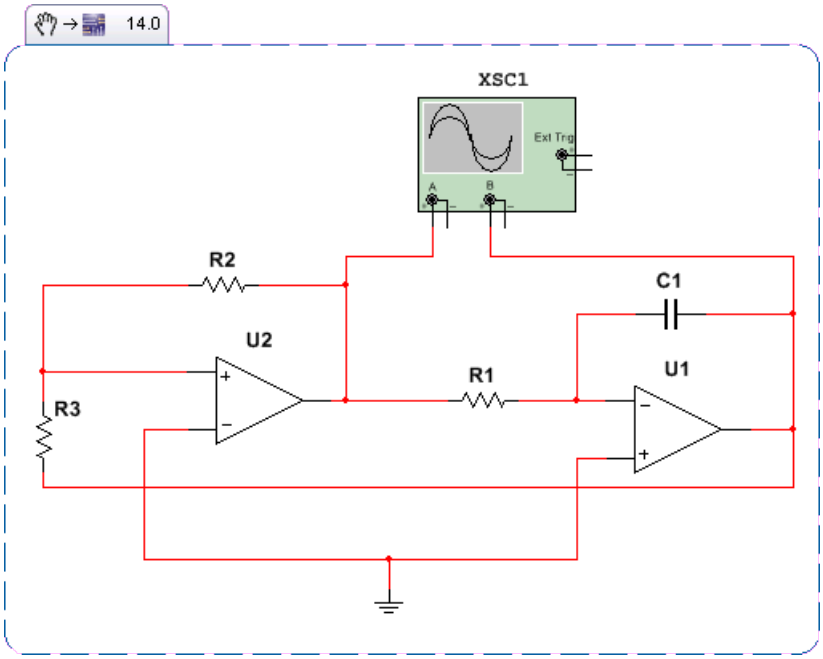


Рис. 6. Формирователь линейно-изменяющегося напряжения на основе интегратора

низации отрицательной обратной связи. Подключив к нему схему ключевого выходного каскада, можно получить полноценную схему управления с ШИМ.

Для примера рассмотрим модель импульсного понижающего стабилизатора напряжения с ШИМ в канале управления. Базовая схема импульсного понижающего стабилизатора напряжения (конвертор buck-типа) показана на рис. 8.

Модель стабилизатора, соответствующая базовой схеме, представлена на рис. 9. В качестве ключа в модели используется биполярный транзистор.

Для упрощения модели схема генератора пилообразного напряжения представлена моде-

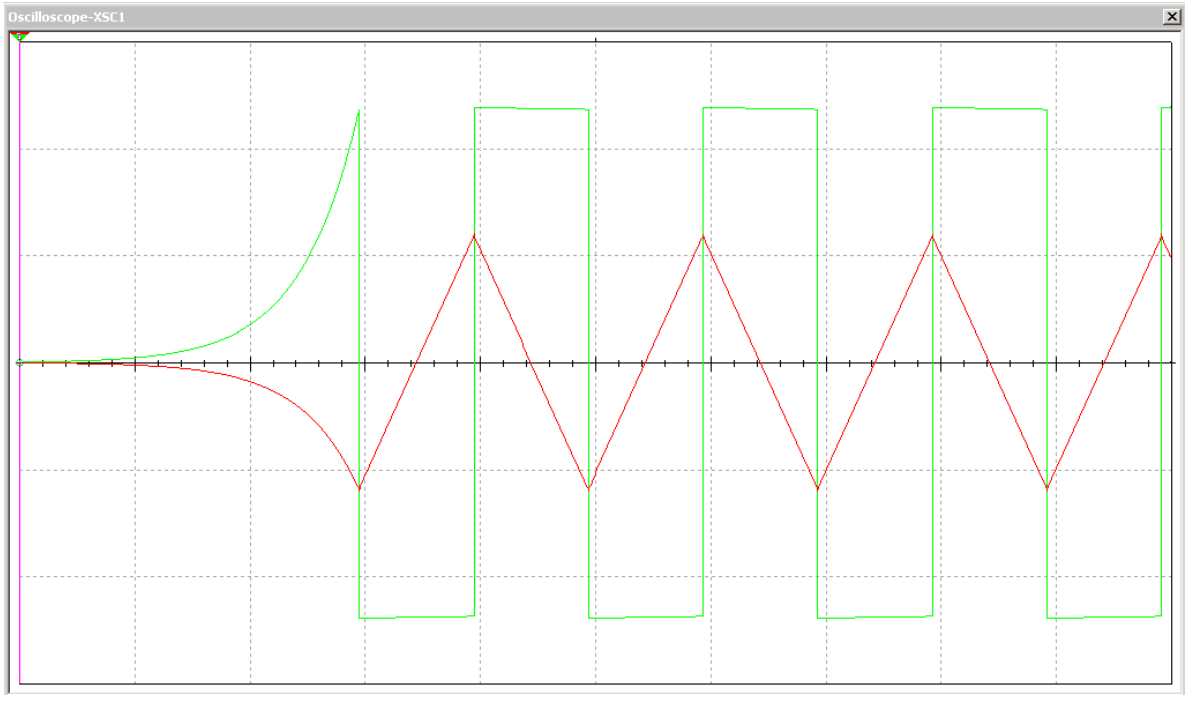


Рис. 7. Осциллограммы работы формирователя ЛИН

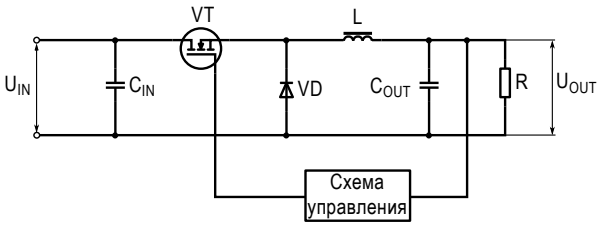


Рис. 8. Базовая схема стабилизатора

лью генератора V2. На компаратор напряжения U1 поступает пилообразное напряжение с генератора V3 и усилителя ошибки U2. Ключевой выходной каскад собран на биполярных транзисторах Q1 и Q2, и элементах R1, R2, R3. Нагрузкой стабилизатора является резистор R4. Элементы L1, D1, C1 обеспечивают нужное качество выходного напряжения стабилизатора. Входной сигнал – величина стабилизируемого напряжения – задается интерактивным источником постоянного напряжения V1. Поскольку задача схемы поддерживать напряжение на нагрузке R4 в соответствии с входным напряжением V1, то сигнал отрицательной обратной связи – напряжение на R4 – поступает непосредственно на инвертирующий вход усилителя ошибки U2. Напряжение ошибки сравнивается с пилообразным напряжением на компараторе U1. При включенном компараторе на выходе присутствует напряжение 5В, ключевой каскад открыт, нагрузка подключена к источнику напряжения V2, в дроссель L1 происходит «накачка» энергии. При выключенном компараторе на выходе присутствует напряжение 0В, ключевой каскад закрыт, энергия, накопленная в дросселе L1, расходуется в виде тока через нагрузку R4 и замыкающий диод D1. На рис. 10 приведены осциллограммы напряжений на коллекторе выходного транзистора Q2 и напряжение на нагрузке R4 в момент включения стабилизатора и во время работы в номинальном режиме.

При построении электропривода переменного тока часто используется замкнутый способ реализации ШИМ. Имитационная модель, представленная на рис. 11, иллюстрирует такой способ преобразования аналогового сигнала в дискретный.

Здесь за счет отрицательной обратной связи по току и релейного элемента – компаратора напряжения U1 – ток в нагрузке пульсирует около заданного значения. Амплитуда и частота пульсаций определяется параметрами *R* и *L* активно-индуктивной нагрузки, шириной петли гистерезиса компаратора. Часто такой способ релейного управления называют «токовым коридором». При реализации «токового коридора» инвертор представляет собой источник тока, а управление электрической машиной в этом случае относится к частотно-токовому.

На рис. 12 представлены эпюры напряжений на входе компаратора: задающее плавно изменяющееся напряжение источника V1 и напряжение на нагрузке R4. Рисунок иллюстрирует выход системы управления на режим, когда значение напряжения на нагрузке существенно отличаются от входного напряжения, момент захвата и работу в номинальном режиме. Величина погрешности стабилизации напряжения и

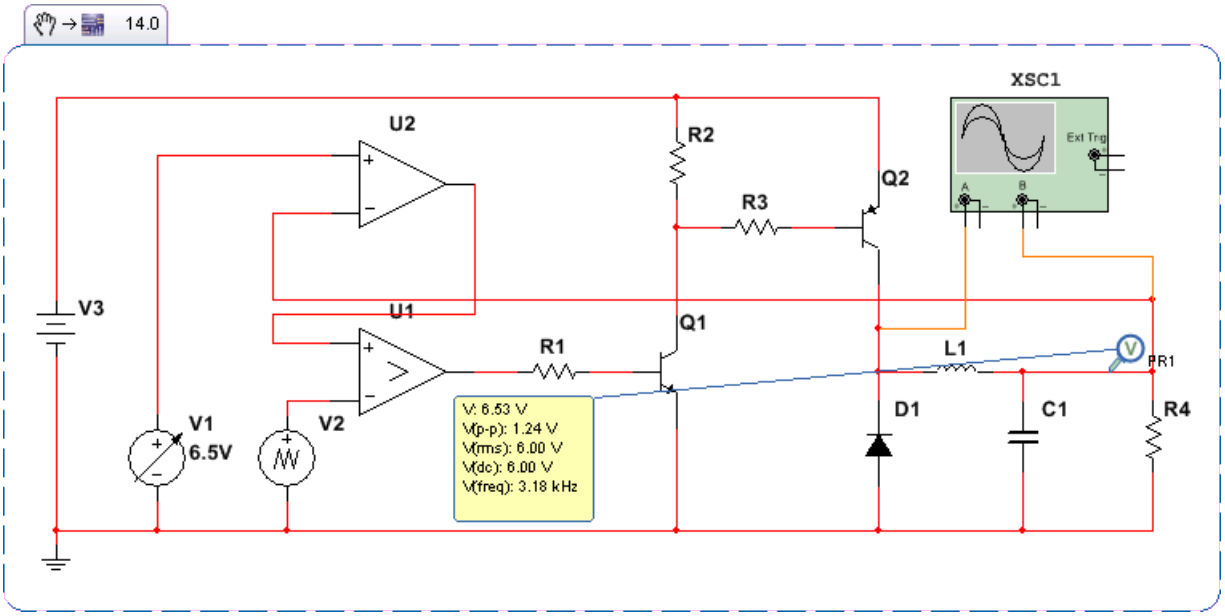


Рис. 9. Модель стабилизатора напряжения с ШИМ

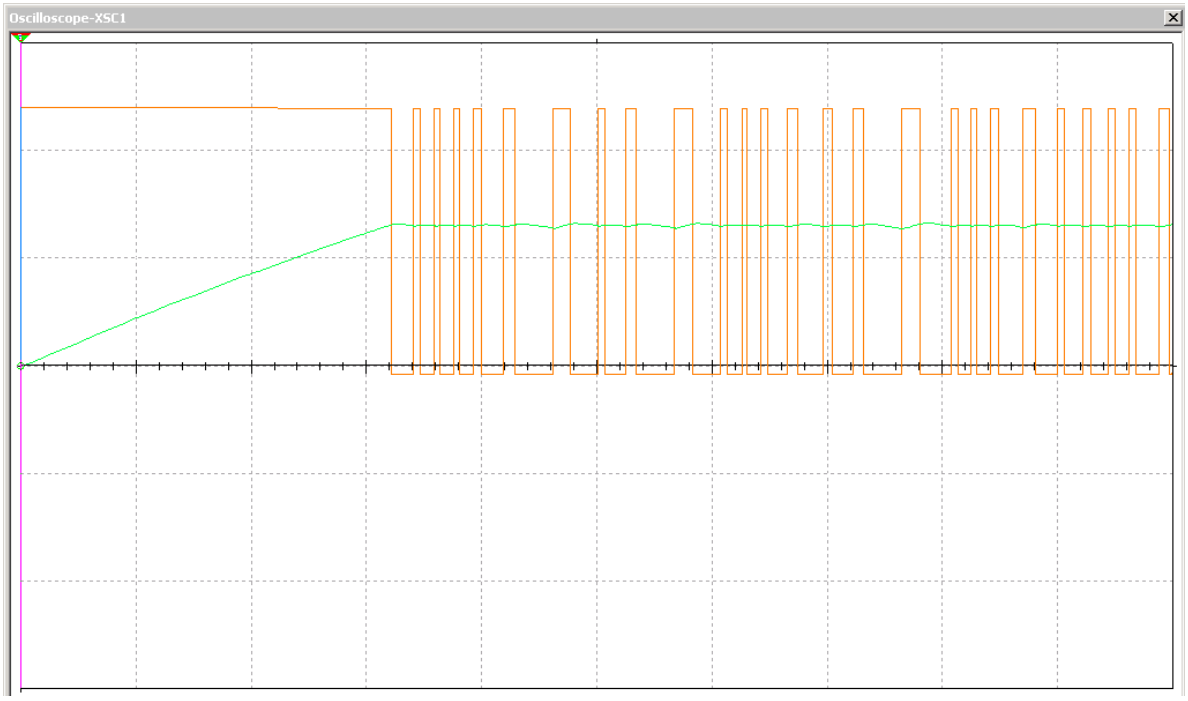


Рис. 10. Осциллограмма работы стабилизатора

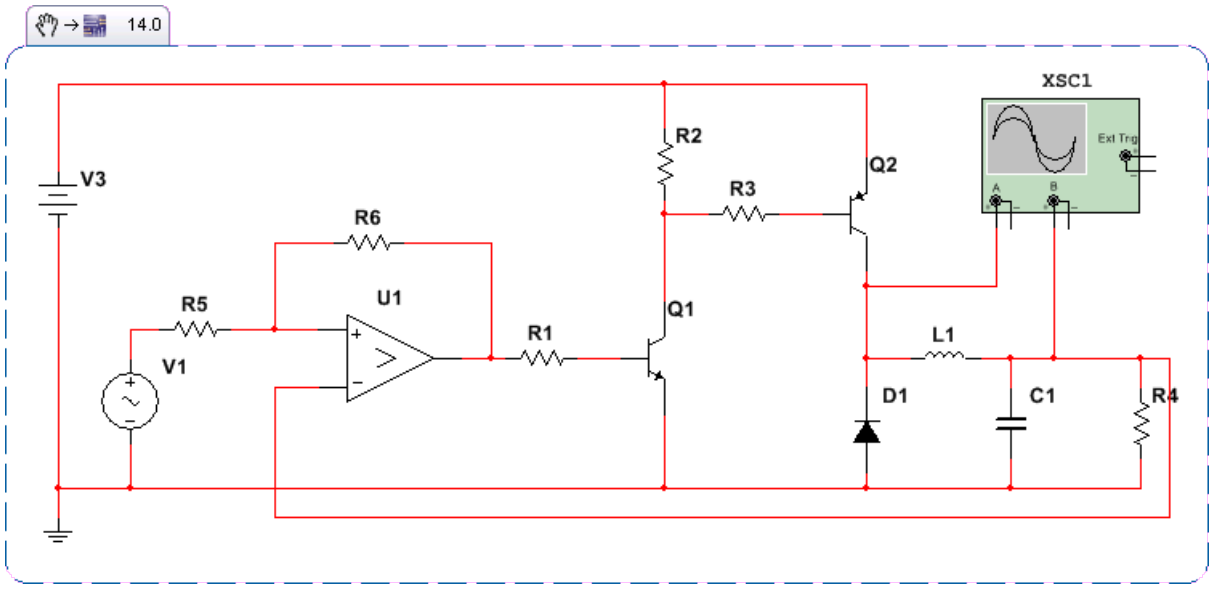


Рис. 11. Реализация модели «токового коридора»

ее пульсация, в частности, зависят от величины гистерезиса компаратора, который в данной модели задается элементами R5, R6. Зависимость частоты включения выходного каскада (подключения нагрузки к источнику напряжения) представлена на рис. 13. Следует понимать, что в данном случае нагрузкой для выходного каскада является цепь L1R4.

Схемотехника цифровых ШИМ обычно остается за пределами рассмотрения, поскольку эти устройства чаще всего являются частью микроконтроллеров и рассматриваются исключительно с точки зрения программирования. Некоторое исключение составляют микросхемы типа i8053 – многофункционального программируемого таймера, которые могут использоваться не только в составе оригинального микропроцессорного комплекта, но и совместно с другими программируемыми устройствами или даже с имитаторами таковых.

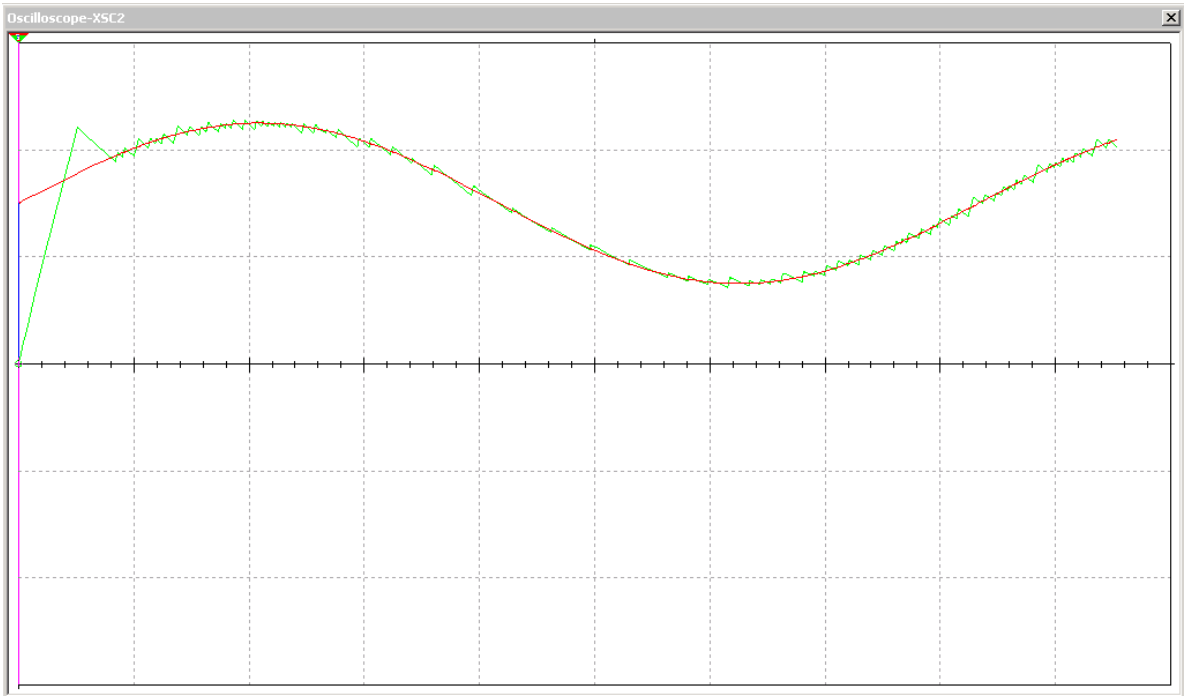


Рис. 12. Сигналы на входах компаратора

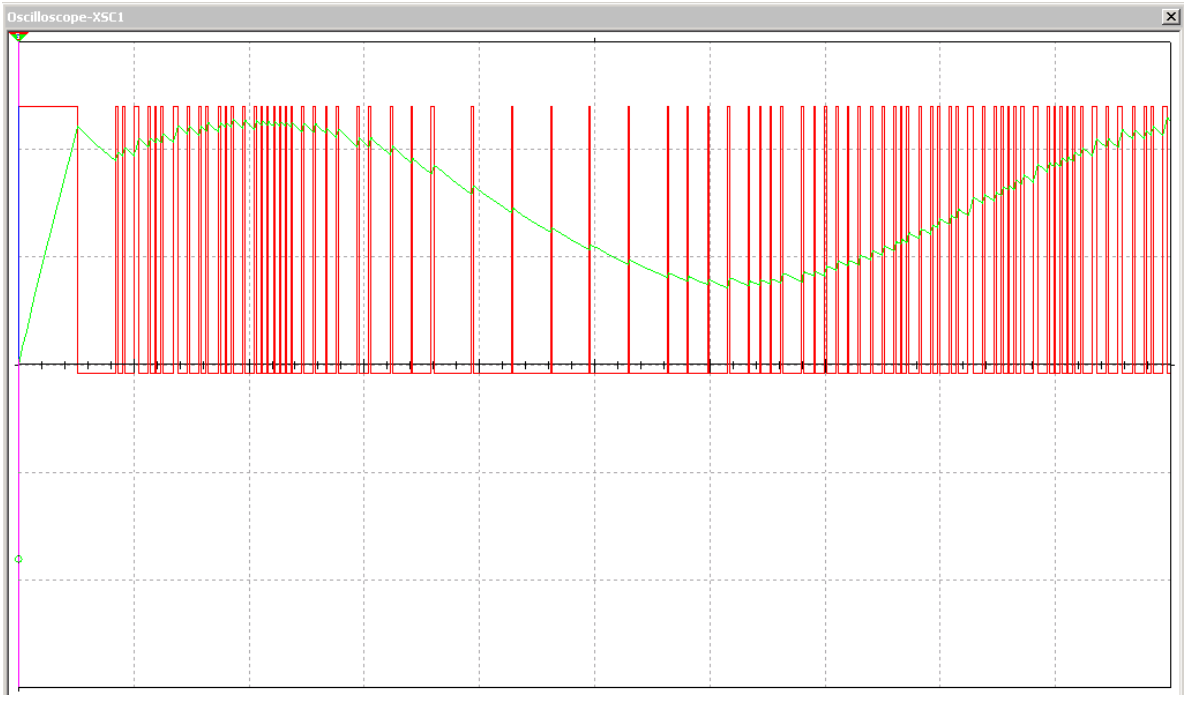


Рис. 13. Осциллограмма работы выходного каскада

Если отвлечься от конкретного представления сигналов, цифровой ШИМ оказывается очень схожим с аналоговым. Он так же содержит компаратор (цифровой) и источник опорного сигнала, в качестве которого выступает двоичный n-разрядный счетчик. Как правило, разрядность счетчика кратна 8.

Простая схема, позволяющая имитировать работу ЦШИМ, представлена на рис. 14. Основу устройства составляют цифровой компаратор

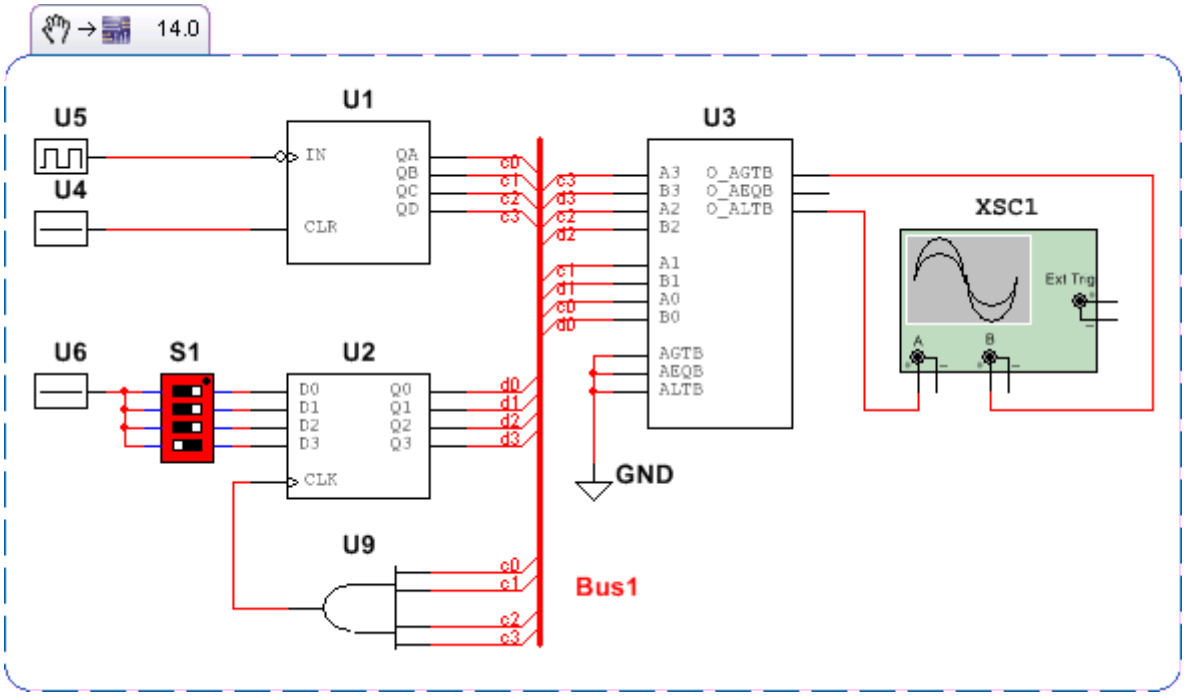


Рис. 14. Модель цифрового ШИМ

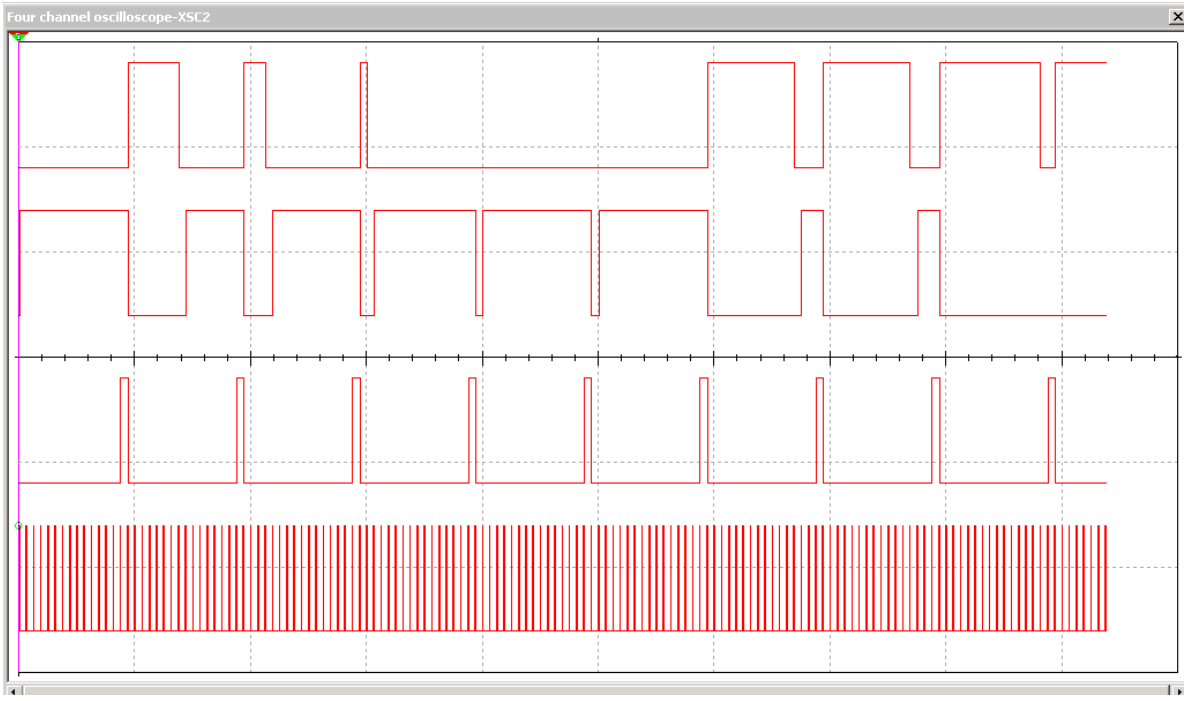


Рис. 15. Диаграмма работы цифрового ШИМ

U3, счетчик U1, формирующий опорный сигнал и задающий период работы, и регистр U2, хранящий текущее значение задающего сигнала. Ключ S1 имитирует регистр, принимающий входной сигнал от микропроцессора. Элемент U9 обеспечивает синхронизацию загрузки нового значения задающего сигнала с началом цикла счетчика. Схема реализует 4-разрядный преобразователь, обеспечивающий 16 ступеней ширины выходных импульсов. Выходы компарато-

ра позволяют сформировать двухфазный выходной сигнал без использования дополнительных элементов.

Работу цифрового ШИМ иллюстрирует рис. 15, на котором представлены выходные сигналы (две верхние осциллограммы), сигнал начала цикла и тактовые импульсы. Выходные сигналы показаны для нескольких входных значений.

Отдать предпочтение тому или иному способу реализации ШИМ в общем случае нельзя. Устройства управления должны реализовать тот способ, который обеспечивает минимальные потери в ключах выходного каскада и минимальные пульсации напряжения (тока) в нагрузке.

В заключение следует отметить, что рассмотренные модели преобразователей могут быть легко реализованы в виде аппаратных макетов. Сравнительный анализ работы виртуальных и реальных моделей позволит глубже изучить вопросы, связанные с ШИМ-преобразованием сигналов, функционированием преобразователей и их применением в разрабатываемой аппаратуре.

Библиографический список

1. NI Multisim™ User Manual, 374483D-01, National Instruments Corp., 2009.

2. Multisim Component Reference Guide, 374485A-01, National Instruments Corp., 2007.

3. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники. М.: Бином, 2015. 704 с.

4. *Пейтон А., Волш В.* Аналоговая электроника на операционных усилителях. М.: Бином, 1994. 352 с.

ЭЛЕКТРОПРИВОД, ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

УДК 621.311 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-120-125**

Э. А. Гильманов*
кандидат технических наук, главный энергетик, начальник службы
А. Н. Яшин**
ассистент
М. И. Хакимьянов**
доктор технических наук, профессор
**Государственное унитарное предприятие Республики Башкортостан «Уфаводоканал»*
***Уфимский государственный нефтяной технический университет*

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВЕТРОСОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

В статье рассмотрены подходы к построению имитационной модели элементов ветросолнечной энергетической установки. Представлены осциллограммы вольтамперных характеристик системы фотоэлектрического преобразователя при различных значениях интенсивности солнечного излучения и температуры окружающей среды. Показаны осциллограммы влияния ступенчатого изменения скорости ветра на напряжение, ток и мощность ветроэнергетической установки.
Ключевые слова: *возобновляемый источник энергии, солнечная электростанция, ветряная электростанция, ветрогенератор, имитационное моделирование.*

E. A. Gilmanov*
PhD Sc. Tech., Chief Power Engineer, Head of Service
A. N. Yashin**
Assistant
M. I. Khakimyanov**
Dr. Sc. Tech., Professor
**State unitary enterprise Republic of Bashkortostan «Ufavodochanal»*
***Ufa State Petroleum Technological University*

DEVELOPMENT OF MODELS OF ELEMENTS OF A WIND SOLAR POWER PLANT IN THE MATLAB SIMULINK

The article describes the approaches to building a simulation model of the elements of a wind solar power plant. Oscillograms of current-voltage characteristics of the photoelectric converter system are presented for various values of solar radiation intensity and ambient temperature. Oscillograms of the influence of a step change in wind speed on the voltage, current and power of a wind power plant are presented.
Keywords: *renewable energy source, solar power plant, wind power plant, wind generator, simulation.*

Введение

Основным ресурсом использования энергии в России являются нефть и газ, что приводит к высоким выбросам углекислого газа и других газов. В современном мире становится актуальным использование возобновляемых источников энергии за счет их низкого ущерба для окружающей среды.

По существующим оценкам технический ресурс возобновляемых источников энергии (ВИЭ) составляет не менее 4,5 млрд т. у. Т. в год, что более чем в 4 раза превышает объем потребления всех топливно-энергетических ресурсов России. Экономический потенциал ВИЭ зависит от существующих экономических условий, стоимости, наличия и качества запасов ископаемых топливно-энергетических ресурсов, региональных особенностей и т. д. Указанный потенциал меняется во времени и должен специально оцениваться в ходе подготовки и реализации конкретных программ и проектов по развитию ВИЭ [1]–[5].

Построить модель ветросолнечной энергетической установки (ВСЭУ), описывающую процессы так, как они проходили бы в действительности, позволяет метод имитационного моделирования.

Имитационное моделирование – это метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему, с которой проводятся эксперименты с целью получения информации об этой системе. Экспериментирование с моделью называют имитацией [5]–[10].

Разработка имитационной модели ветросолнечной энергетической установки

Моделирование ВСЭУ проводится в среде Matlab Simulink. Имитационная модель будет состоять из следующих подсистем:

– системы фотоэлектрического преобразователя;

– ветроэнергетической установки;

– системы аккумулирования энергии.

Simulink – это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов, строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы [11], [12].

За основу имитационной модели ветросолнечной энергетической установки берется схема подключения ВСЭУ, представленная на рис. 1.

Фотоэлектрическая *PV*-система состоит из солнечных батарей, которые производят электричество путем прямого преобразования солнечной энергии в электричество. Фотоэлементы работают по принципу фотоэлектрического эффекта: солнечный свет состоит из фотонов, каждый из которых содержит разное количество энергии (в зависимости от длины волны). Когда фотон проходит через *PV*-элемент, его энергия передается электрону, который теперь имеет достаточно энергии, чтобы сойти со своей прежней орбиты. Это движение электронов порождает ток, таким образом преобразовывается солнечный свет в электрическую энергию [13].

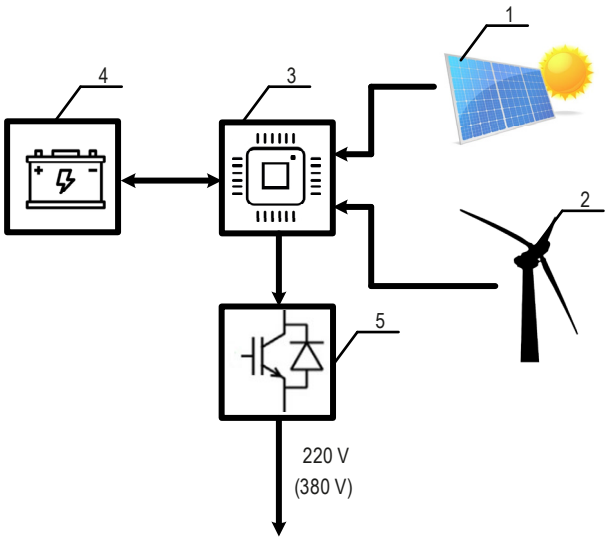


Рис. 1. Схема подключения ветросолнечной энергетической установки: 1 – солнечная батарея; 2 – ветрогенератор; 3 – контроллер; 4 – аккумуляторная батарея; 5 – инвертор

Модель системы фотоэлектрического преобразователя представлена на рис. 2. Данная модель состоит из следующих элементов: фотоэлектрическая солнечная батарея, параллельно соединенные диод, резистор, конденсатор и активную нагрузку.

Важнейшей характеристикой солнечной батареи во время эксплуатации являются вольтамперные характеристики. Результаты моделирования представлены на рис. 3, 4.

Модель ветроэнергетической установки представлена на рис. 5. Данная модель состоит из блока ветрогенератора, трехфазного источника питания, параллельно соединенных диодов, резистора, конденсатора и активной нагрузки.

Основной блок данной модели – это Wind Turbine Induction Generator (WTIG). Обмотка статора соединяется непосредственно с сетью, ротор управляется ветряным двигателем. Мощность, полученная ветряным двигателем, преобразована в электроэнергию генератором и передается в сеть обмоткой статора. Пропорционально-интегральный (ПИ) контроллер используется для управления углом наклона лопастей, чтобы ограничить выходную электрическую мощность до номинальной механической мощности. Угол наклона поддерживается постоянным на уровне 0 градусов, когда измеренная выходная электрическая мощность ниже номинального значения. Когда он превышает свое номинальное значение, ПИ-регулятор увеличивает угол наклона, чтобы вернуть измеренную мощность к ее номинальному значению [14].

Результаты моделирования представлены на рис. 6, 7.

Модель системы аккумулирования энергии представлена на рис. 8. Данная модель из блока аккумуляторной батареи, двунаправленного блока постоянного тока (БПТ) и схемы контроля БПТ.

Блок Battery реализует общую динамическую модель, которая представляет самые популярные типы аккумуляторных батарей. Двунаправленный блок постоянного тока использует-

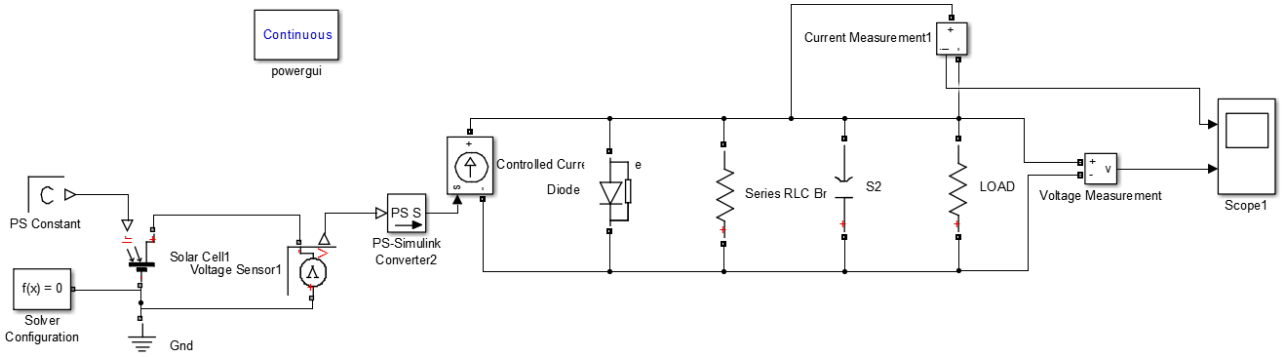


Рис. 2. Модель системы фотоэлектрического преобразователя

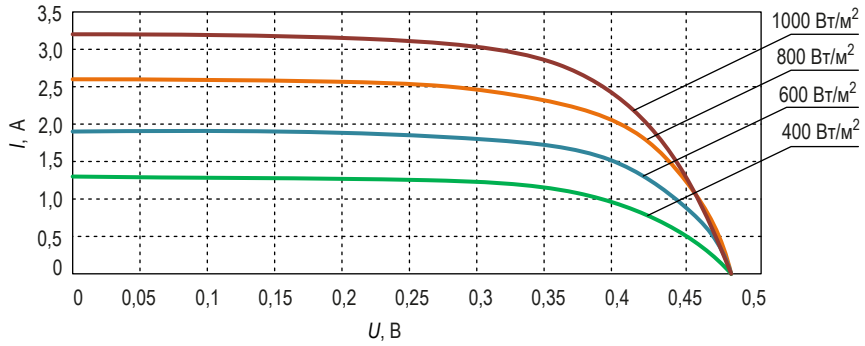


Рис. 3. Вольтамперная характеристика системы фотоэлектрического преобразователя при различных значениях интенсивности солнечного излучения и при постоянной температуре окружающей среды

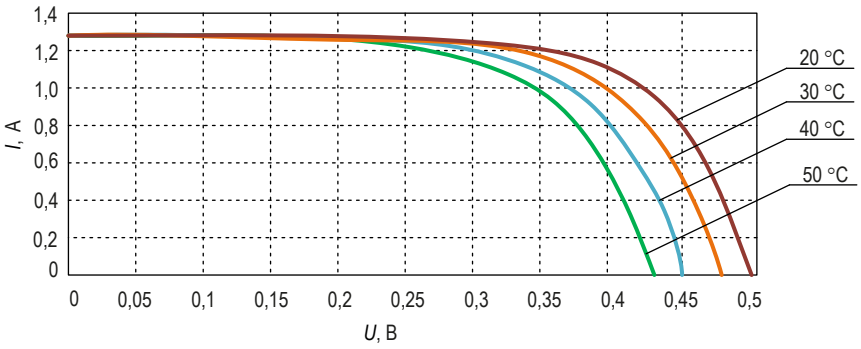


Рис. 4. Вольтамперная характеристика системы фотоэлектрического преобразователя при постоянных значениях интенсивности солнечного излучения и при различной температуре окружающей среды

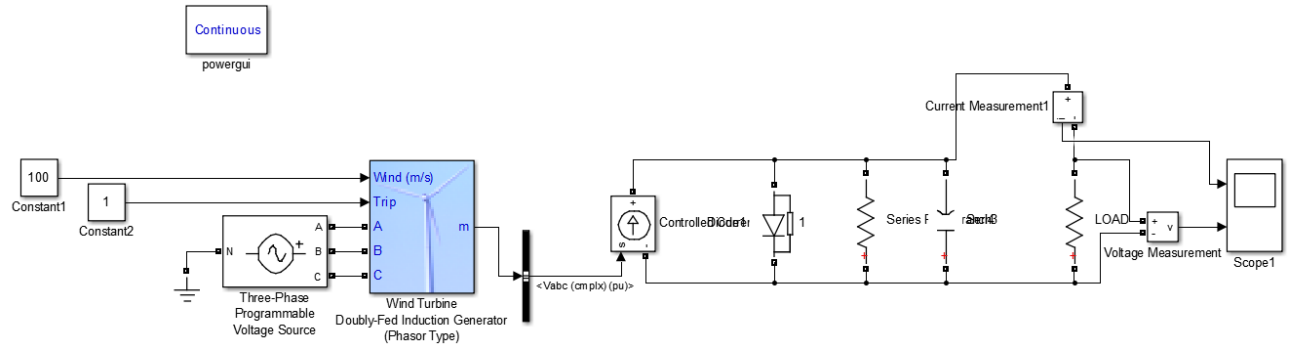


Рис. 5. Модель ветроэнергетической установки

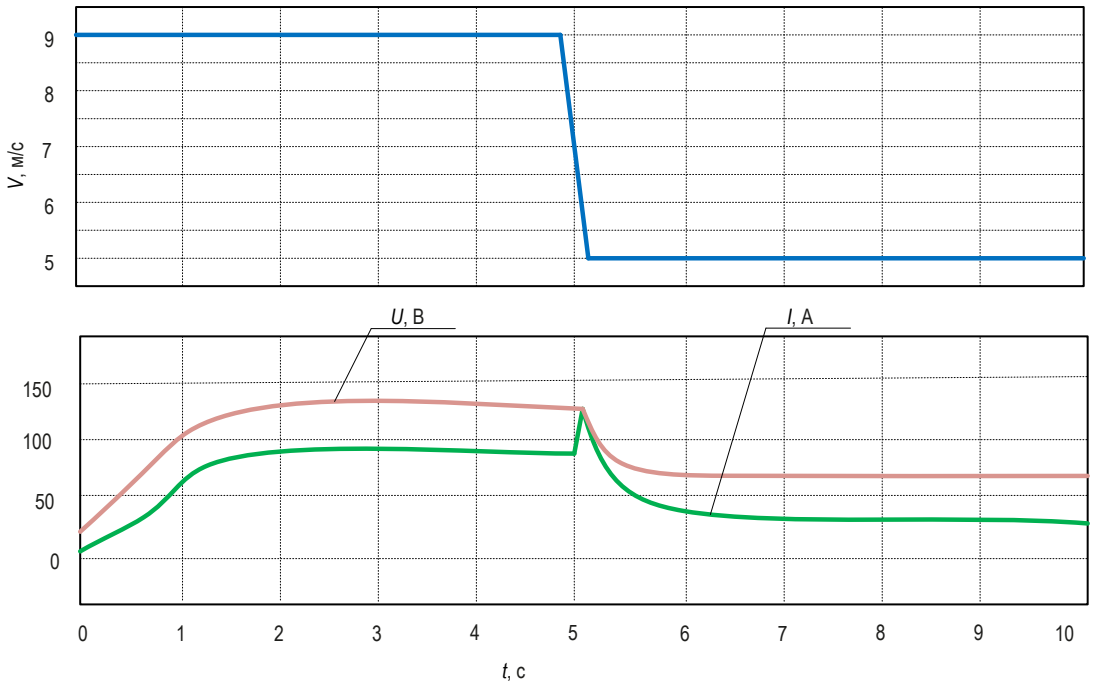


Рис. 6. Влияние ступенчатого изменения скорости ветра на напряжение и ток ветроэнергетической установки

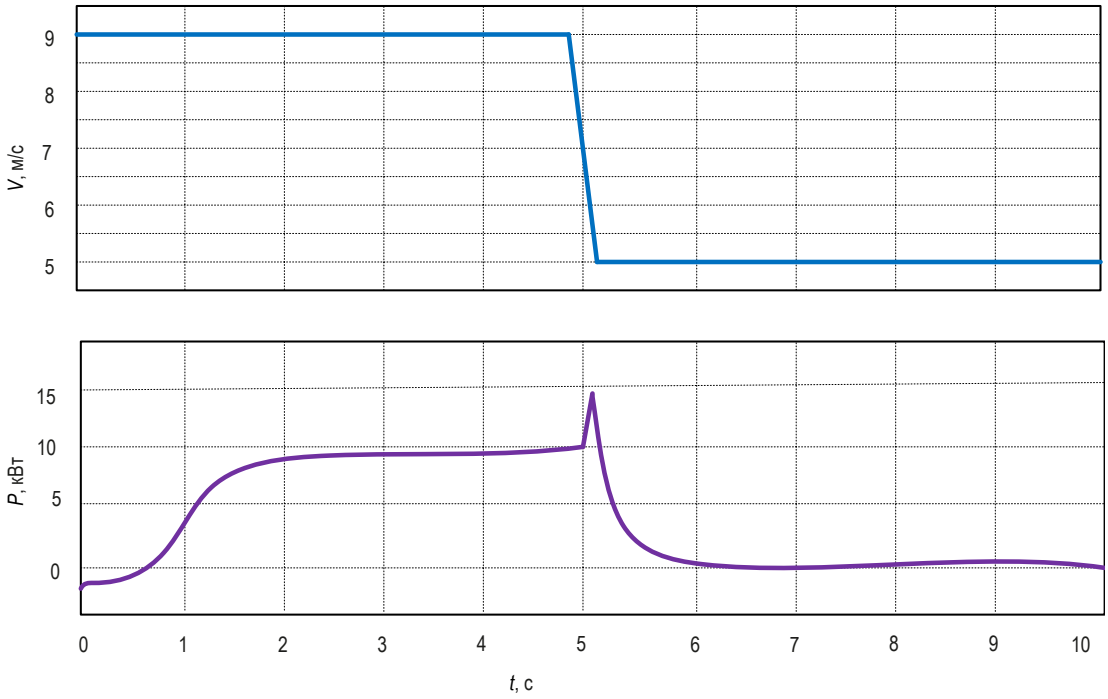


Рис. 7. Влияние ступенчатого изменения скорости ветра на полезную мощность ветроэнергетической установки

ся с целью передать энергию от фотоэлектрической панели источнику энергии в течение времени, когда скорость ветра и уровень солнечной радиации достаточны, чтобы удовлетворить нагрузку, когда напряжение на шине постоянного тока низкое [15].

Объединив модели системы фотоэлектрического преобразователя, ветроэнергетической

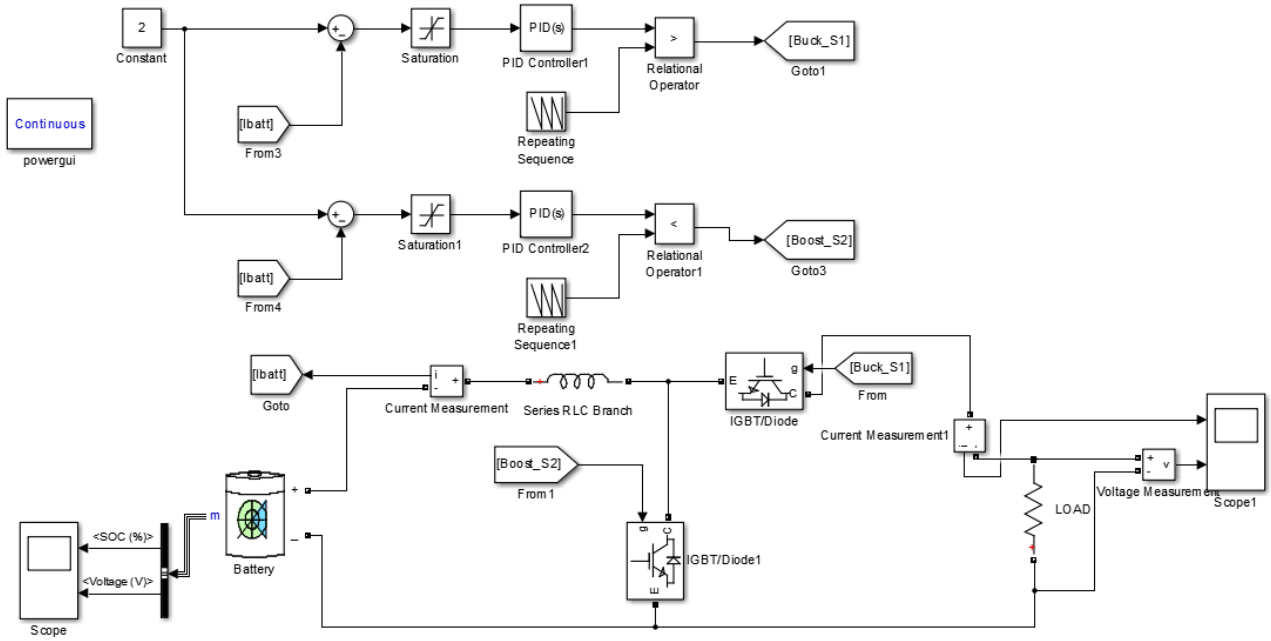


Рис. 8. Модель системы аккумулирования энергии

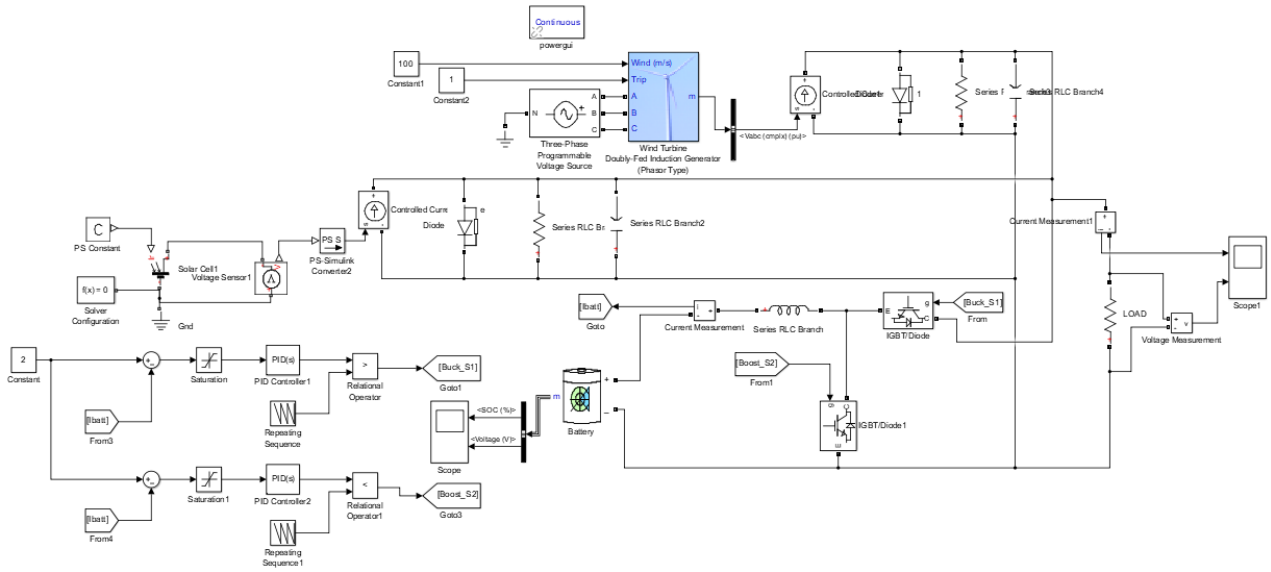


Рис. 9. Модель ветросолнечной энергетической установки

установки и системы аккумулирования энергии, получаем модель ветросолнечной энергетической установки, представленную на рис. 9.

Заключение

В математическом пакете Simulink Matlab были сгенерированы имитационные модели всех основных составляющих ветросолнечной энергетической установки. Были получены осциллограммы вольтамперных характеристик системы фотоэлектрического преобразователя при различных значениях интенсивности солнечного излучения и температуры окружающей среды, которые говорят об адекватности разработанной модели. Также были получены осциллограммы влияния ступенчатого изменения скорости ветра на напряжение, ток и мощность ветроэнергетической установки.

Разработанная модель ветросолнечной энергетической установки может быть полезна для моделирования переходных процессов энерге-

тических установок на базе возобновляемых источниках энергии.

Библиографический список

1. *Eder L.* The current state of the petroleum industry and the problems of the development of the Russian economy // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 84. N 1. P. 012012.

2. *Лукутин Б. В., Муравлев И. О., Плотников И. А.* Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учебное пособие. Томск, 2015. 128 с.

3. *Акопов А. С.* Имитационное моделирование: учебник и практикум для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2014. 389 с.

4. *Amjith L., Bavanish B.* A review on biomass and wind as renewable energy for sustainable environment // Chemosphere. 2022. Vol. 293. P. 133579.

5. *Du X.* Dielectric elastomer wave energy harvester with self-bias voltage of an ancillary wind generator to power for intelligent buoys // Energy Conversion and Management. 2022. Vol. 253. P. 115178.

6. *Lan H., Gou Z., Xie X.* A simplified evaluation method of rooftop solar energy potential based on image semantic segmentation of urban streetscapes // Solar Energy. 2021. Vol. 230. P. 912–924.

7. *Pan J.* Improve efficiency of harvesting wind energy by integrating bi-stability and swinging balls // Mechanical Systems and Signal Processing. 2022. Vol. 170. P. 108816.

8. *Solman H., Kirkegaard J., Smits M.* Digital twinning as an act of governance in the wind energy sector // Environmental Science & Policy. 2022. Vol. 127. P. 272–279.

9. *Cousse J., Trutnevyte E., Hahnel U.* Tell me how you feel about geothermal energy: Affect as a revealing factor of the role of seismic risk on public acceptance // Energy Policy. 2021. Vol. 158. P. 112547.

10. *Jurasz J., Ciapa a B.* Solar – hydro hybrid power station as a way to smooth power output and increase water retention // Solar Energy. 2018. Vol. 173. P. 675–690.

11. *Яшин А. Н., Гильманов Э. А., Хакимьянов М. И.* Моделирование механических характеристик асинхронного двигателя в пакете Matlab Simulink // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. Т. 17. № 2. С. 67–75.

12. *Kiyakli A., Solmaz H.* Modeling of an electric vehicle with MATLAB/Simulink // International journal of automotive science and technology. 2018. Vol. 2. N 4. P. 9–15.

13. *Бессель В. В., Кучеров В. Г., Мингалеева Р. Д.* Изучение солнечных фотоэлектрических элементов: учеб.-метод. пособие. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, 2016. 90 с.

14. MathWorks. Wind Turbine Induction Generator (Phasor Type). URL: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/windturbineinduction generatorphasortype. html (дата обращения: 02.02. 2022).

15. *Сидоренко А. Д., Калачев П. В., Скрипин А. П.* Резервирование энергии, получаемой от ВИЭ // Norwegian Journal of development of the International Science. 2020. № 45. С. 53–55.

УДК 658.562

О. Г. Преловская*
аспирант
**Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ*

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ КАК ОБЯЗАТЕЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ОБЩЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

На основе авторского определения проблемы в качестве проблем идентифицированы потери, связанные с отклонениями основных элементов общей эффективности использования оборудования (OEE, Overall Equipment Effectiveness). Опираясь на рекомендации международных отраслевых стандартов, процесс «решение проблем» рассмотрен как обязательный инструмент улучшения. В статье сделаны выводы об универсальном характере и перспективности применения инструмента «решение проблем», указаны ключевые элементы, определяющие результативность его использования.
Ключевые слова: *производительность, общая эффективность оборудования, OEE, проблема, решение проблем.*

O. G. Prelovskaya*
PhD Student
**St. Petersburg Electrotechnical University LETI*

PROBLEM SOLVING AS A MANDATORY TOOL TO IMPROVE PRODUCTIVITY AND OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS

Based on the author's problem definition, losses associated with the main overall equipment effectiveness (OEE, Overall Equipment Effectiveness) elements are defined as problems. According to recommendations of international industry standards, the «problem solving» process is considered as a mandatory tool for improvement. The paper presents the conclusion of «problem solving» tool universal nature and future widespread, the key elements determining its effective application are highlighted.
Keywords: *productivity, overall equipment effectiveness, OEE, problem, problem solving.*

Повышение производительности, как одна из ключевых задач экономического развития России, сегодня решается в рамках национального проекта «Производительность труда и поддержка занятости». Цель проекта – обеспечение к 2024 году для средних и крупных предприятий базовых несырьевых отраслей экономики роста производительности труда не ниже 5 % в год и достижение десятипроцентного прироста производительности труда (в процентах к предшествующему году) [1]. Содержание федеральных проектов имеет системный характер и предусматривает адресные меры по повышению производительности труда, а также поддержку занятости и повышение эффективности рынка труда. Системными должны быть и инструменты достижения этой цели.

Одним из инструментов повышения производительности, рекомендованных отечественными экспертами, является OEE – «система анализа общей эффективности работы оборудования, предназначенная для контроля и повышения эффективности производства и основанная на измерении и обработке конкретных производственных показателей» [2]. Оценка общей эффективности оборудования предполагает использование трех показателей эффективности: A (availability), доступность; P (performance), производительность; Q (quality), качество [3]. Авторская визуализация компонентов OEE представлена на рис. 1.

Расчет OEE производится следующим образом: OEE=A x P x Q.

Отклонения основных элементов общей эффективности использования оборудования OEE приводят к основным видам потерь. Примеры потерь, влияющих на эффективность использования оборудования, приведены в табл. 1 по материалам [4].

Опираясь на определение проблемы как отклонения выхода системы от требуемого или желаемого, при котором требуются действия для нахождения причины и/или ее устранения [5], выявляемые отклонения, ведущие к потерям, следует идентифицировать именно как проблемы, ко-

Рис. 1. Компоненты OEE и основные виды потерь

торые необходимо решать. С учетом такой трактовки основным инструментом работы по повышению производительности должно стать «решение проблем».

Важность работы с проблемами уже отражена в отраслевых стандартах качества, разработанных на основе ИСО9001:2015. Так, в международном автомобильном стандарте IATF16949:2016 раздел 10 «Улучшение» дополнен специфическим требованием, согласно которому организация должна иметь документированный процесс «10.2.3 Решение проблем» [6], включающий в себя: 1) определенные подходы для проблем различного вида и масштаба; 2) сдерживание, временные действия и соответствующие виды деятельности, необходимые для управления несоответствующими выходам; 3) анализ коренной причины, методологию, анализ и результаты; 4) осуществление системных корректирующих действий, включая рассмотрение влияния на подобные процессы и продукты; 5) верификации результативности корректирующих действий; 6) рассмотрение и, когда необходимо, актуализация соответствующей документированной информации.

Для реализации процесса решения проблем, связанных с эффективностью использования оборудования, необходимо собрать данные о базовом уровне OEE и выявить проблемные зоны для улучшения, что включает в себя четыре этапа, содержание которых раскрыто ниже.

Этап 1: определение категорий потерь

Авторская разработка содержания данного этапа представлена на рис. 2.

Этап 2: определение процесса и единиц оборудования для сбора данных

Зарубежные авторы определили ключевые этапы работы с OEE [7], [8].

Этап 3: сбор данных для определения базового уровня OEE и его элементов

Сбор и фиксация точной информации о работоспособности оборудования имеет решающее значение для создания надежных отчетов об уровне эффективности использования оборудования и его элементов. Ряд производственных компаний используют ручные методы сбора данных, что может снижать эффективность принимаемых решений [9]. Как правило, при ручном сборе данных обычно выполняется второй этап ручной компиляции данных, чаще всего это достигается путем ввода информации в электронные таблицы.

Автоматизация сбора данных является первым шагом как в повышении точности расчета OEE, так и в снижении затрат на подготовку отчетов [10]. Необходимо определить конкретные точки сбора данных. Во многих случаях пункты сбора данных уже существуют. Для этих точек

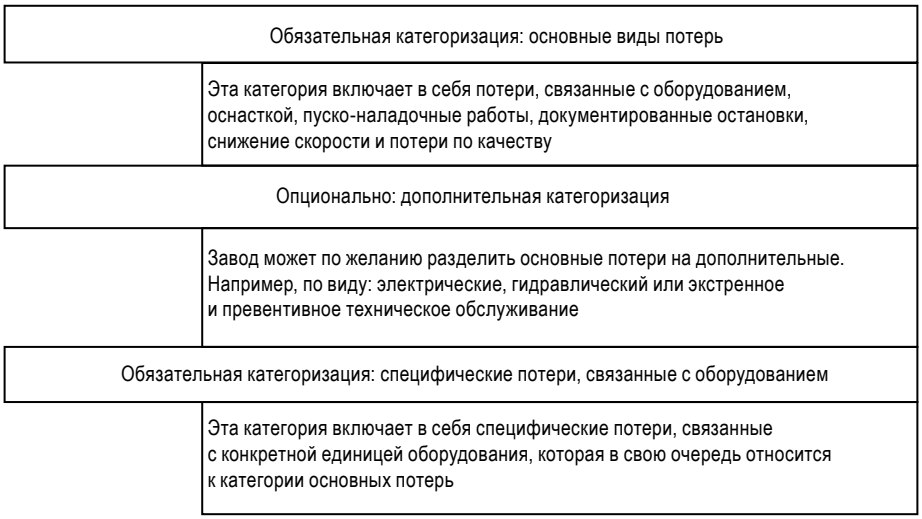


Рис. 2. Определение категорий потерь

мониторинга требуется извлечь имеющиеся данные. В других случаях может потребоваться установка устройств мониторинга и сбора данных, например, датчиков, которые после установки могут фиксировать измерения многочисленных параметров. Датчики могут определять скорость потока, вес, количество, активность движения, фазы подачи электроэнергии, а также многие другие параметры.

Существуют и другие средства сбора информации, включая встроенное программное обеспечение для управления оборудованием и программное обеспечение для мониторинга параметров оборудования. Важным моментом мониторинга является наличие информации о дате, времени и местоположении сбора данных [10]. Данные, собранные с точек мониторинга, должны быть переданы в базу данных для хранения данных и отчетности. База данных, которая собирает и записывает информацию о состоянии, может быть общедоступным пакетом базы данных ПК [9]. В дополнение к индивидуальным внутренним системам баз данных доступны интегрированные системы сбора данных с пакетами прикладного программного обеспечения с полными отчетами об OEE и его элементах.

Одним из современных методов сбора данных является внедрение беспроводной локальной сети или других беспроводных технологий для сбора и передачи данных, что значительно повышает своевременность, эффективность и гибкость системы сбора данных. Более того, Индустрия 4.0 значительно расширила возможности применения новых решений в области искусственного интеллекта (AI, Artificial Intelligence) и машинного обучения (ML, Machine Learning) для мониторинга и оптимизации промышленных процессов. Одним из ключевых элементов этой новой промышленной революции является создание массивов данных на основании мониторинга процессов, предоставляемых киберфизическими системами (CPS, Cyber-Physical System), интегрированными в производственные процессы [11].

Подчеркнем, что разработка индивидуального решения для сбора и анализа данных OEE, независимо от метода реализации, будь то ручной сбор, полуавтоматизированный или основанный на искусственном интеллекте и/или машинном обучении, представляет собой один из ключевых элементов успешного решения задач повышения производительности и эффективности использования оборудования.

Этап 4: анализ данных и процесс решения проблем

Реализуется с помощью цикла PDCA (Планируй-Делай-Изучай-Действуй, от англ. Plan-Do-Check-Act). Данный этап подразумевает процесс управления и измерения улучшения работы оборудования [7]. Процесс продолжается до тех пор, пока цель не будет достигнута. Выбор методов решения проблем зависит от внутренних процессов компании, при этом важно, чтобы каждый из этапов цикла PDCA основывался на данных и анализировался с помощью релевантных инструментов. Например, для фазы [9]:

1. «Планируй» рекомендуется использовать такие аналитические инструменты, как диаграмма Пейнтера (англ. Paynter chart), диаграмма Парето, контрольная карта (англ. Control charts), график выполнения (англ.run chart), график трендов (англ. Trend chart);

2. «Делай»: 8D, 5 Почему, диаграмма Ишикавы;

3. «Проверяй» рекомендуется использовать такие же инструменты, как и те, что использовались для фазы «Планируй»;

4. «Действуй»: план действий или новый цикл PDCA.

Как было отмечено выше, необходимость использования инструмента решения проблем закреплена в отраслевом стандарте IATF16949:2016. Схожие требования установлены для железнодорожной промышленности, например, международный стандарт IRIS и руководство 7:2014 «Решение проблем». Ссылка на данные стандарты носит рекомендательный характер, рассматривая установленное требование в виде эталонов, которые постепенно становятся обязательным инструментом любой производственной компании. Результативность процесса решения проблем представляет собой второй значимый элемент, влияющий на повышение производительности и эффективности использования оборудования.

Заключение

Приоритетное для отечественной промышленности направление повышения производительности обусловило внимание к OEE. Известная как золотой стандарт измерения производительности производства, OEE основана на оценке трех ключевых показателей: доступности, производительности и качества. Отклонения от этих ключевых элементов приводят к основным видам потерь, которые идентифицированы автором как проблемы, требующие использования специального инструмента, процесса «решения проблем». Можно заключить, что процесс решения проблем представляет собой обязательный инструмент, направленный на поиск причины возникновения проблемы, внедрение корректирующих и превентивных действий. Инструмент «решение проблем» не ограничен конкретной сферой или отдельной областью применения. Универсальность этого инструмента определяет перспективность его использования. Результативность процесса решения проблем, наряду с разработкой индивидуального решения для сбора и анализа данных OEE, являются наиболее значимыми элементами повышения производительности и эффективности использования оборудования [12].

Библиографический список

1. Национальный проект «Производительность труда и поддержка занятости». URL: https://www.economy.gov.ru/material/directions/nacionalnyy_proekt_proizvoditelnost_truda/ (дата обращения: 12.01.2022).

2. Оценка эффективности работы оборудования. URL: https://www.fnc-group.ru/calculator-oee. html (дата обращения: 12.01.2022).

3. *Fam S.* Overall Equipment Efficiency (OEE) Enhancement in Manufacture of Electronic Components & Boards Industry through Total Productive Maintenance Practice // MATEC Web of Conference. 2018. Vol. 150. N 05037. P.1–5.

4. *Nakajima S.* An Introduction to TPM. Portland: Productivity Press. 1998. 122 p.

5. *Преловская О. Г.* Проблема: прагматическая значимость определения понятия в управлении качеством // Наука и бизнес: пути развития. 2020. № 12 (114). С. 103–106.

6. IATF 16949:2016. Системы менеджмента качества автомобильной промышленности. Международная целевая группа автомобильной промышленности. 2016. 61 с.

7. *Patel C., Deshpande V.* A review on improvement in overall equipment effectiveness // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). 2016. Vol. 4. Iss. XI. P. 642–650.

8. *Puvanasvaran A.* Overall Equipment Efficiency Improvement Using Time Study in an Aerospace Industry // Malaysian International Tribology Conference. 2013. N 68. P. 271–277.

9. *Leachman R.* Closed-loop measurement of equipment efficiency and equipment capacity // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. 1997.

10. *Wang T., Pan H.* Improving the OEE and UPH data quality by Automated Data Collection for the semiconductor assembly industry // Expert Systems with Applications. 2011. Vol. 38. Iss. 5. P. 5764–5773.

11. *Bonada F.* AI for Improving the Overall Equipment Efficiency in Manufacturing Industry // New Trends in the Use of Artificial Intelligence for the Industry 4.0. URL: https://www.intechopen.com/books/9428 (дата обращения: 12.01.2022).

12. CQI-21 Effective Problem Solving Leader Guide. Automotive Industry Action Group. 2012. 33 p.

УДК 621.311

Р. Т. Хазиева*
кандидат технических наук, доцент
П. И. Васильев*
аспирант, ассистент
Р. Р. Афлятунов*
аспирант, ассистент
**Уфимский государственный нефтяной технический университет*

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИНТЕГРИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОМПОНЕНТА В СОСТАВЕ ГИБРИДНЫХ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

В статье рассмотрена возможность использования многофункционального интегрированного электромагнитного компонента в составе гибридных фильтрокомпенсирующих устройств. Интеграция элементов фильтрокомпенсирующих устройств позволяет в конечном счете снизить массогабаритные показатели и повысить надежность устройства в целом.
Ключевые слова: *многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент, гибридные фильтрокомпенсирующие устройства, интеграция элементов, катушка индуктивности, конденсатор.*

R. T. Khazieva*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
P. I. Vasilyev*
PhD Student, Assistant
R. R. Aflyatunov*
PhD Student, Assistant
**Ufa State Petroleum Technical University*

ON THE POSSIBILITY OF USING A MULTIFUNCTIONAL INTEGRATED ELECTROMAGNETIC COMPONENT AS PART OF HYBRID FILTER COMPENSATING DEVICES

The article considers the possibility of using a multifunctional integrated electromagnetic component as part of hybrid filter compensating devices. The integration of elements of filter-compensating devices ultimately makes it possible to reduce weight and size and improve the reliability of the device as a whole.
Keywords: *multifunctional integrated electromagnetic component, hybrid filter compensating devices, integration of elements, inductor, capacitor.*

На сегодняшний день электротехнические комплексы промышленных предприятий нефтегазовой отрасли оснащены огромным количеством нелинейной нагрузки в виде систем частотнорегулируемого электропривода насосных агрегатов, систем воздушного охлаждения газа, вентиляции и т. д. Нелинейные нагрузки, как известно, плохо влияют на уровень качества электроэнергии. Они искажают форму тока и напряжения, что в свою очередь может вызвать нежелательные потери энергии в элементах систем электроснабжения. Появление высших гармонических составляющих приводит к дополнительным потерям в электрических машинах, достигающих 20 % от уровня суммарных потерь. Присутствие в сети предприятия высших гармоник сказывается на сроке службы изоляционных материалов основного электрооборудования и приводит к ложным срабатываниям релейной защиты.

Повысить качество электроэнергии можно за счет использования пассивных (рис. 1) и активных фильтрокомпенсирующих (ФКУ) устройств. Пассивные ФКУ имеют свой недостаток, заключающийся в необходимости расчета уровня высших гармоник в случае нового, дополнительного подключения нелинейных нагрузок, а также сложность компенсации гармоник на высоких частотах, высокие массогабаритные показатели.

Когда в сети присутствует большое количество высших гармоник разного порядка, то це-

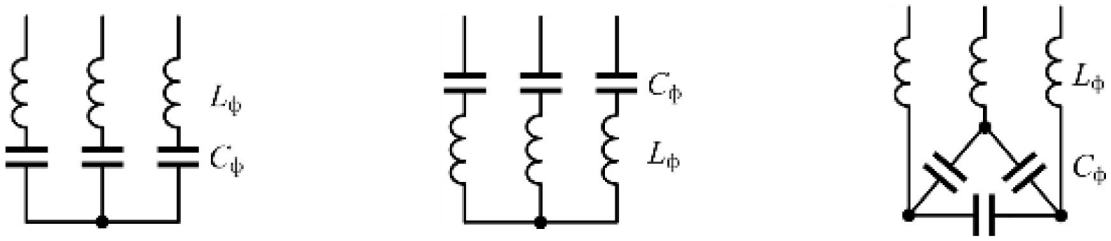


Рис. 1. Схемы пассивных ФКУ

лесообразным будет применение активных и гибридных ФКУ. Активные фильтры позволяют компенсировать весь спектр гармоник, в отличие от пассивных, которые настроены на определенные частоты. Однако применение только активных фильтров имеет недостаток, который заключается в высокой стоимости оборудования такого рода.

Применение гибридных ФКУ позволит снизить стоимость активных фильтров за счет снижения их мощности, так как пассивные фильтры в составе гибридной установки будут настраиваться на частоты высоких гармоник, а активный фильтр будет осуществлять дополнительную фильтрацию.

При этом авторами предлагается заменить элементы в составе пассивного фильтра высших гармоник – катушку индуктивности и конденсатор, на многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент (МИЭК), который представляет собой проводящие обкладки, свернутые в спираль и разделенные диэлектриком. МИЭК выполняет функции катушки индуктивности и конденсатора, поэтому данное решение позволяет значительно снизить массу и габариты готового устройства, а также снизить расход на токопроводящие, изоляционные и конструкционные материалы.

Рассмотрим гибридную структуру на основе последовательного подключения активного фильтра и параллельного подключения пассивного фильтра. Схема подключения показана на рис. 2.

В схеме на рис. 2 в составе пассивного фильтра высших гармоник используются традиционные элементы: катушка индуктивности и конденсатор. Авторами предлагается заменить их гибридным элементом, который будет выполнен в виде трехсекционного МИЭКа, схема которого показана на рис. 3. Интеграция катушек индуктивности и конденсаторов в единый технологический компонент позволит снизить массогабаритные показатели ФКУ и повысит надежность устройства.

Предлагаемое устройство состоит из трех секций, каждая из которых выполняет функции конденсатора и катушки индуктивности. Секция будет подключаться к определенной фазе, тем самым образуя фильтр гармоник, на которую будут настроены.

Благодаря тому, что единое устройство выполняет функцию двух (катушки индуктивности и конденсатора), то улучшаются массогабаритные показатели и повышается надежность устройства традиционного ФКУ, о котором говорилось ранее.

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 приори-

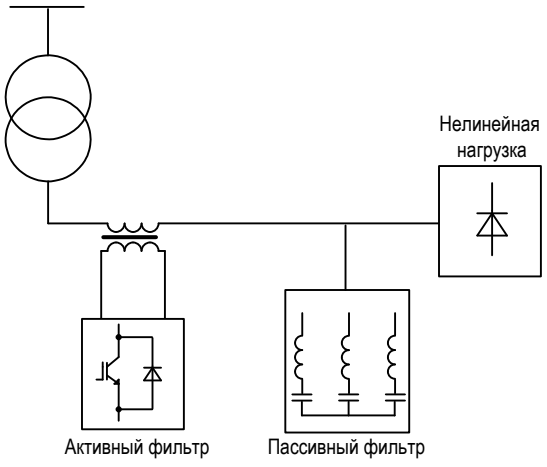


Рис. 2. Схема подключения ГФУ

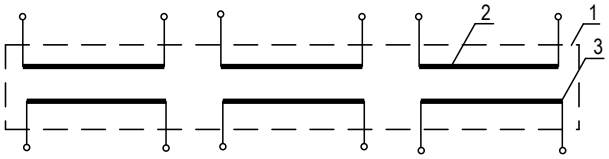


Рис. 3. Схемотехническое исполнение МИЭК: 1 – МИЭК; 2, 3 – первая и вторая проводящие обкладки

тетным 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».

Библиографический список

1. *Pogorelov A.* Improving Filter-Compensating Devices in Power Supply Systems of Mine Hoists // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2019.

2. *Sharanya M., Basavaraja B., Sasikala M.* Power quality improvement using a combination of hybrid active power filter and thyristorised controlled reactor // International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS). 2017.

3. *Praveen D., Nagarajan C.* Hybrid Filter for Distorted Voltage Source in Microgrids // Conference on Emerging Devices and Smart Systems (ICEDSS). 2018.

4. *Rahmani S., Al-Hadda K.* Single Phase Multilevel Hybrid Power Filter for Electrified Railway Applications // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2006.

5. *Liu H., Zhang M., Yang Y.* A New Control Method for Harmonic Compensating and Resonance Damping in Hybrid Filter // Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT). 2018.

6. *Xiangyang X., An L., Fen G.* Research on the influence of reducing dead-time on the output of hybrid active power filter // 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. 2009.

7. *Panda G., Dash S., Sahoo N.* Comparative performance analysis of Shunt Active power filter and Hybrid Active Power Filter using FPGA-based hysteresis current controller // IEEE 5th India International Conference on Power Electronics (IICPE). 2012.

8. *Konesev S., Khazieva R., Bochkareva T.* Mathematical modeling of inverter with a hybrid resonant circuit operation modes // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2018.

9. *Sattarov R., Khazieva R., Ivanov M.* Research of a multifunctional integrated electromagnetic component as LC filter in dc/dc converters // Smart energy systems. 2021.

10. *Sattarov R., Khazieva R., Ivanov M.* Integrated LC-components for electrical systems and devices // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) (IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry. 2021.

ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 53.097 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-133-135**

Г. Г. Антонов*
кандидат технических наук
**Институт электрофизики и электроэнергетики РАН*

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДА С НЕРАВНОВЕСНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

Представлены результаты исследования разряда с неравновесной ионизацией в сверхзвуковом потоке слабоионизированного (ne ~ 109 cm^{-3}) чистого азота и смеси N_2+CO_2+He, поддерживаемом электродуговым нагревом азота. Установлено, что устойчивый режим горения разряда сохраняется и в области аномально высоких значений приведенной напряженности электрического поля E/p до 0,35 V/cm·Pa при плотности тока анода порядка 0,05 A/cm^2, вдвое превышающей нормальную. Наибольшее превышение мощности в режиме комбинированной накачки по отношению к мощности в режиме газодинамического лазера составило 80 % и не является предельным.
Ключевые слова: *сверхзвуковой поток, неравновесная ионизация, газодинамический лазер, комбинированная накачка.*

G. G. Antonov*
PhD Sc. Tech.
**Institute for Electrophysics and Electric Power, Russian Academy of Sciences*

THE STUDY OF THE DISCHARGE WITH NON-EQUILIBRIUM IONIZATION IN A SUPERSONIC FLOW

The paper deals with the study results of the discharge with non-equilibrium ionization in a supersonic flow of weakly ionized (ne ~109 cm^{-3}) nitrogen and N_2+CO_2+He mixture, supported by the nitrogen electric-arc heating. It is determined that sustainable discharge mode is kept in the areas of abnormally high values of the reduced electric field strength E/p up to 0.35 V/cm·Pa, when the current density at the anode is 0.05 A/cm^2, which is twice the normal. Under the conditions of the combined pumping, the maximal increase of the lasing power over the lasing power the gasdynamic laser mode is 80 % and it is not limiting.
Keywords: *supersonic flow, non-equilibrium ionization, gasdynamic laser, combined pumping.*

В [1]–[4] сообщалось о получении значительного превышения концентрации электронов в сверхзвуковом потоке азота, нагреваемого в плазмотроне над равновесным значением. В данной статье представлены экспериментальных результаты, полученные на газодинамическом стенде, подробное описание которого содержится в [1], [2].

Стенд позволяет формировать сверхзвуковые потоки со скоростью $(0{,}9\div2{,}0)\cdot10^5$ cm/s при статической температуре 250÷400 K и давлении 1,0÷7,0 kPa.

В процессе исследования разряда, контролируемого неравновесной ионизацией в сверхзвуковом потоке, слабоионизированного ($n_e \sim 10^9$ cm^{-3}) чистого азота и смеси N_2+CO_2+He регистрировались вольтамперные характеристики (ВАХ), напряженность электрического поля E с помощью двойного цилиндрического электростатического зонда при плавающем потенциале, производились спектроскопические измерения и фоторегистрация разряда. Оценивалось влияние разряда на генерацию лазерного излучения в режиме комбинированного возбуждения.

Эксперименты проводились в канале прямоугольного сечения (23×2 cm^2 на входе) с полууглом раскрытия узких стенок 0,5°. Для формирования объемного разряда использовалась медная пластина 22×12 cm^2 – анод. В качестве мультикатода – 150 стальных электродов диаметром 0,1 cm, введенных заподлицо с диэлектрической платой из фторопласта. Пять рядов по 30 электродов в каждом с шагом 0,5 cm распределены на площади 29 cm^2 (14,5×2 cm^2). Расстояние между электродными платами 2,2 cm, ограничительные сопротивления в цепи катода

3,9 kOm. Напряжение на разрядный промежуток подавалось от конденсаторной батареи либо непосредственно, либо через RC-цепь с регулируемой постоянной времени от 1 до 10 ms.

Разряд равномерно заполняет весь промежуток и имеет диффузный характер. Как следует из вольтамперной характеристики (кривые 1 и 2) рис. 1, катодное падение составляет 400±50 V. Напряженность электрического поля, измеренная с помощью двойного зонда и рассчитанная по ВАХ, составляла от 80 до 300 V/cm в зависимости от уровня электропроводности потока, а приведенная напряженность E/p от 0,03 до 0,12 V/cm·Pa (от 4 до 15 V/cm·tor).

Мощность, вкладываемая в разряд, существенно зависит от давления и состава газа и находится в пределах от 60 W/cm^3 для чистого азота до 200 W/cm^3 для смеси 82 %N_2+3 %CO_2 +15 %He при давлении p=2,9 kPa. В последнем случае после восходящей ВАХ до плотности тока j ~ 0,18 A/cm^2 начинается участок параллельный оси тока – кривая 2 на рис. 1. По мере увеличения тока на анодной плате появляются многочисленные светящиеся точки – привязки, что характерно при переходе диффузного разряда к контрагированному. Становится заметной эрозия диэлектрика катодной платы: вокруг штыревых электродов образуются конусообразные углубления. Спектр разряда регистрирует появление фторопласта. Таким образом, границей устойчивости разряда в сверхзвуковом потоке чистого азота при давлении 2,9 kPa является плотность тока j < (0,18 ±0,02) A/cm^2.

Существенно, что изменение наклона ВАХ для смеси и граница устойчивости разряда в чистом азоте соответствует плотности тока, близкой к определенной в [5] для квазистационарного разряда в азоте нормальной плотности тока на аноде, квадратично растущей с давлением $j_{н.\,а.=}$2,4·10^{8}p^2 A/cm^2·Pa^2. Для давления 2,9 kPa $j_{н.\,а.=}$0,2 A/cm^2. Таким образом, полученный в данных условиях уровень удельного объемного энерговклада не может быть увеличен за счет плотности тока и при фиксированной напряженности электрического поля близок к предельному.

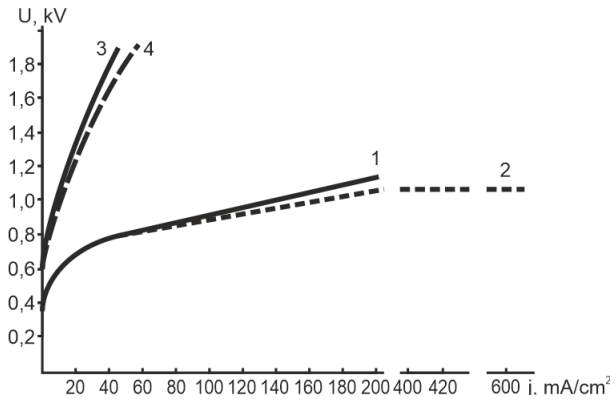


Рис. 1. Вольтамперная характеристика диффузного разряда в сверхзвуковом потоке: 1 – азот, 2 – смесь 82 % N_2+3 % CO_2 +15 % He, p=2,9 kPa; 3 – азот, 4 – смесь 82 % N_2+3 % CO_2 +15 % He, p=1 kPa

С целью определения возможности увеличения удельного энерговклада в единицу массы газа за счет развития объема разрядной камеры в длину (по оси потока) проводились исследования на канале с углом раскрытия 3°. Мультикатод состоял из 20 рядов по 44 электрода в каждом. Шаг, как и в первом случае, – 0,5 cm. Длина катодной платы по оси потока 10 cm. Фторопластовый диэлектрик заменен на неорганический материал АБН. Среднее межэлектродное расстояние 3,75 cm, балластные сопротивления в цепи штыревых катодов 6,6 kOm.

Из-за большего расширения канала (площадь поперечного сечения газоразрядной камеры с углом раскрытия 3° вдвое превышает размер сопловой решетки) статическое давление в камере уменьшается до p=(1±0,1) kPa, а нормальная плотность тока анода до $j_{н.\,а.=}$0,024 A/cm^2. В результате граница устойчивого горения разряда смещается в область меньших плотностей тока. При сохранившейся напряженности электрического поля рост напряжения на разрядном промежутке пропорционален увеличению межэлектродного расстояния. В свою очередь снижение объемного энерговклада пропорционально уменьшению плотности тока. Эти изменения иллюстрируются рис. 1, где представлены вольтамперные характеристики разряда в технически чистом азоте (3) и смеси N_2/CO_2 /He (4) при давлении 1 kPa.

Измерения показали, что по мере увеличения длины разрядной камеры наблюдается линейный рост полного тока разряда I (рис. 2) и удельного энерговклада E/G. Отсутствие зависимости плотности тока и напряженности электрического поля от длины разрядной камеры в области устойчивого горения разряда (j < 0,2 A/cm^2 при давлении порядка 3 Kpa и j < 0,06 A/cm^2 при давлении 1 Kpa) свидетельствует о его несамостоятельности, так как ионизация во внекатодной области газового разряда не обусловлена собственным размножением электронов в электрическом поле, приложенном к разрядному промежутку. В свою очередь отсутствие признаков накопления возмущений – о значительных возможностях увеличения удельного энерговклада. Примечательно, что устойчивый режим горения разряда сохраняется и в

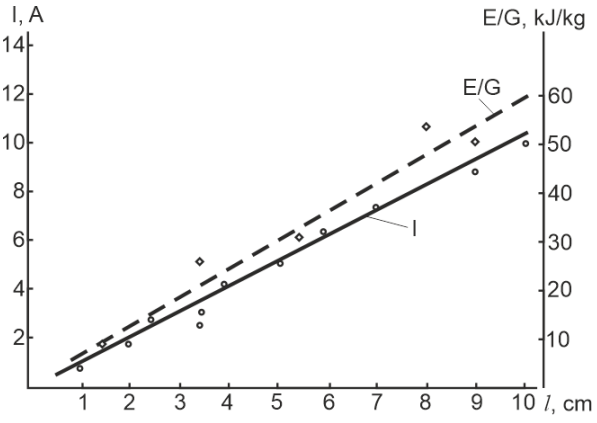


Рис. 2. Зависимость полного тока диффузного разряда I и удельного энерговклада E/G в сверхзвуковом потоке от длины разрядной камеры l

области аномально высоких значений приведенной напряженности электрического поля – до 0,35 V/cm·Pa (40 V/cm·tor) при плотности тока анода порядка 0,05 A/cm^2, вдвое превышающей нормальную.

Влияние разряда на генерацию лазерного излучения исследовалось в режиме комбинированного возбуждения для канала с раскрытием 0,5° при статическом давлении в канале 2,9 Kpa [1], [2]. Наибольшее превышение к мощности в режиме газодинамического лазера получено при плотности тока разряда 0,25–0,38 A/cm^2 (70–110 W/cm^3) и составило от 50 до 80 %. При увеличении плотности тока j от 0,6 до 1 А/см^2 приращение мощности генерации прекращается. При переходе разряда в контрагированный режим при j>1 А/см^2 происходит срыв генерации.

Максимальная эффективность накачки электрическим разрядом в области значений плотности тока j=0,25–0,38 A/cm^2, далеких от предельных значений j и удельного энерговклада E/G согласуются с результатами исследований [1]. Как следует из вольтамперных характеристик разряда по мере увеличения мощности (за счет увеличения плотности тока и напряжения на разрядном промежутке) растет и приведенная напряженность электрического поля E/p. При этом предельные значения E/p, достигающие 0,35 V/cm·Pa (40 V/cm·tor) существенно превышают оптимальную величину 0,045÷0,06 V/cm·Pa, при которой доля энергии разряда, идущая на возбуждение колебательных степеней свободы молекул CO_2 и азота максимальна [6]. Поэтому, не смотря на увеличение объемного энерговклада при плотности тока больше 0,6 A/cm^2, рост мощности генерации сдерживается снижением колебательной эффективности разряда. Согласно результатам [1] дальнейшее повышение удельной мощности генерации в режиме комбинированной накачки возможно за счет увеличения длины газоразрядной камеры при сохранении значений плотности тока разряда и напряженности электрического поля в области максимальной эффективности.

Таким образом, сверхравновесная степень ионизации сверхзвукового потока, поддерживаемая электродуговым нагревом азота, позволяет рассматривать плазмотрон в качестве технически простого источника предионизации для быстропроточного газоразрядного и газодинамического с комбинированной накачкой лазеров.

Библиографический список

1. *Антонов Г. Г., Ковшечников В. Б., Рутберг Ф. Г.* Смесительный газодинамический лазер с неравновесным электродуговым возбуждением // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. Вып. 5. С. 96–101.

2. *Антонов Г. Г., Бородин В. С., Братцев А. Н.* Сверхзвуковой импульсно-проточный газодинамический стенд на электродуговых подогревателях // Мощные генераторы низкотемпературной плазмы и методы исследования их параметров. Л.: ВНИИэлектромаш, 1979. 184 с.

3. *Александров В. Д., Антонов Г. Г., Бородин В. С.* О возможности получения отрыва колебательной температуры азота в распадающейся плазме при высоком давлении // Доклады Академии наук. 1983. Т. 269. № 4. С. 843–845.

4. *Ачасов О. В., Жданок С. А., Рогозин Д. С.* Ассоциативная ионизация двухатомных молекул при адиабатическом расширении в сверхзвуковом потоке // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1981. Т. 81. Вып. 2 (8). С. 550–559.

5. *Акишев Ю. С., Напартович А. П., Перетятько П. И.* Приэлектродные области тлеющего разряда и нормальная плотность тока на аноде // Теплофизика высоких температур. 1980. Т. 18. № 4. С. 873–876.

6. *Басов Н. Г., Беленов Э. М., Данилычев В. А.* Электроионизационные лазеры на сжатом углекислом газе // Успехи физических наук. 1974. Т. 114. Вып. 2. С. 213–247.

УДК 53.097 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-136-139**

Г. Г. Антонов*
кандидат технических наук
А. Н. Братцев*
кандидат технических наук
В. Е. Попов*
кандидат технических наук
**Институт электрофизики и электроэнергетика РАН*

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНО-ПРОТОЧНОГО ПЛАЗМОТРОНА

Представлены результаты исследований характеристик импульсно-проточных электродуговых подогревателей азота с продольно вихревым обдувом, разработанных для экспериментального газодинамического стенда. Время нагрева 0.02÷0.04 s, средняя мощность до 2 MW, средний массовый расход 0,5÷1 kg/s, среднемассовая температура азота 800÷4000 K, давление 3÷7 MPa. Полученные динамические характеристики плазмотронов, их качественный анализ, а также газодинамические характеристики сверхзвукового потока позволяют использовать результаты исследования при создании подобных систем и, в частности, перспективных газодинамических лазеров с неравновесным электродуговым возбуждением.
Ключевые слова: *электродуговой подогреватель, газодинамический стенд, газодинамический лазер.*

G. G. Antonov*
PhD Sc. Tech.
A. N. Brattsev*
PhD Sc. Tech.
V. E. Popov*
PhD Sc. Tech.
**Institute for Electrophysics and Electric Power, Russian Academy of Sciences*

INVESTIGATION OF THE PULSE-FLOW PLASMA GENERATOR PROPERTIES

The paper presents the investigation results of the pulsed-flow electric arc nitrogen heaters with longitudinal vortex blowing designed for an experimental gas-dynamic stand. Heating time is 0.02-0.04 s, average power is up to 2 MW, average mass flow rate – 0.5-1 kg/s, average mass temperature of nitrogen is 800-4000 K, pressure is 3-7 MPa. The obtained dynamic characteristics of plasma torches, their qualitative analysis, as well as the gas-dynamic characteristics of the supersonic flow make it possible to use the results of the study when creating such systems, and in particular, promising gas-dynamic lasers with nonequilibrium electric arc excitation.
Keywords: *electric-arc heater, gas-dynamic desk, gasdynamic laser.*

Применение плазмотронов в качестве источников термически возбужденного газа для мощных газодинамических лазеров (ГДЛ) наряду с определенными технологическими преимуществами (широкий диапазон изменения таких параметров, как время работы, температура, давление и состав газа) имеет определенные специфические особенности, присущие электродуговому нагреву. Среди них значительный контраст температур – среднемассовой и в зоне дуги, а также присутствие в составе плазмы материала электродов. Термодинамически неравновесный характер нагрева, возможный в силу первой, может повысить эффективность ГДЛ [1], [2]. Вторая особенность позволяет вводить в состав газа легко ионизуемой примеси для реализации комбинированной накачки с помощью несамостоятельного разряда. В то же время предъявляются жесткие требования к выходящему из подогревателя потоку и, прежде всего, к его пространственно-временной однородности. Одним из путей удовлетворению этому требованию является создание подпора в выходном сечении, что влечет за собой определенные изменения режима работы плазмотрона и его конструкции.

При проектировании экспериментального сверхзвукового газодинамического стенда [3], [4] был разработан имульсно-проточный электродуговой подогреватель азота (ЭДПЛ-N_2), состоящий из следующих основных узлов (рис. 1):

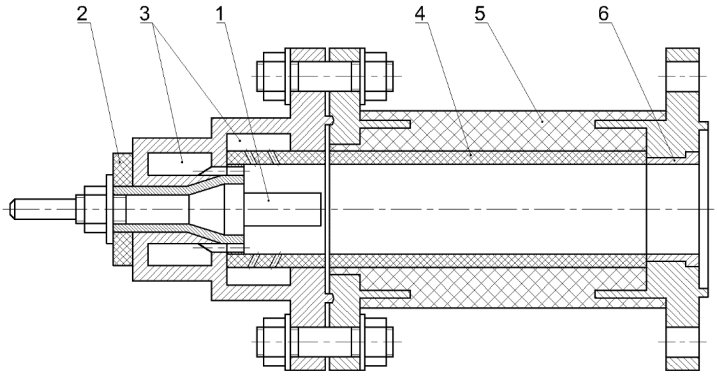


Рис. 1. Электродуговой подогреватель азота (ЭДПЛ-N_2): 1 – катод из вольфрама марки ВЛ-10, вмонтированный в стальной держатель; 2 – фторопластовое уплотнение-изолятор; 3 – газовый коллектор, представляющий собой цилиндрическую конструкцию с двумя полостями для осуществления осесимметричной и тангенциальной подачи газа в дуговую камеру; 4 – термостойкий керамический цилиндр из Al_2O_3, армированный стеклоэпоксидным корпусом 5; 6 – анодный узел – медное кольцо, запрессованное в стальной фланец

Уже чисто внешние, конструктивные признаки определяют ЭДПЛ-N_2 как промежуточное звено между импульсными [5] и стационарными плазмотронами [6]. Родство с импульсными определяется отсутствием водоохлаждения и импульсным характером работы. Со стационарными – проточным режимом и наличием тангенциальной подачи в электродуговую камеру. В работах, посвященных исследованию стационарных систем нагрева газа большой мощности, отмечалось значение тангенциальной подачи в электродуговую камеру [6]. Следует, однако, подчеркнуть ее роль в описываемом в настоящей работе ЭДПЛ-N_2. В оптимальном (с точки зрения выходных параметров газодинамического стенда) режиме нагрева (время нагрева ~ 0.03s, средняя мощность ~ 10^6 W, средний массовый расход ~ 0.5 kg/s, средняя энтальпия струи ~ 10^6 J/kg) электродуговая камера (ЭДК) объемом 150 cm^3 и ее изоляция испытывают крайне тяжелые тепловые нагрузки, снижающие и ресурс, и эффективность нагрева. Исследования показали, что лишь интенсивная (до 50 % суммарного массового расхода) тангенциальная подача позволяет без заметного увеличения диаметра разрядной камеры (нежелательного из-за трудностей сопряжения ЭДПЛ с сопловой решеткой [3], [4]) защитить теплоизоляцию от разрушения путем создания холодного пристеночного слоя.

В качестве критериев оценки работы ЭДПЛ-N_2 рассматриваются: давление и температура в смесительной камере **p**с. к и **T**с. к, энергоэффективность энерговклада в разряд (отношение вложенной к запасенной в конденсаторной батарее энергии), степень надежности (ресурс), а также газодинамические характеристики сверхзвукового потока.

Оценка **T**с. к производилась на основании измерения давления в смесительной камере при «холодном» (без нагрева в плазмотронах) и «горячем» (с нагревом) пусках в предположении, что расход газа через ЭДПЛ в первом и втором случаях одинаков. Для принятых в процессе предварительных исследований значений давления на входе в плазмотрон (4,7–5,6 MPa) это предположение справедливо лишь в течение первых 12–15 ms нагрева, после чего расход через ЭДПЛ значительно уменьшается. Поэтому полученные значения **T**с. к следует рассматривать как чисто качественные оценки снизу.

Источником питания плазмотрона служит конденсаторная батарея емкостью 4800 μF с запасаемой энергией до 60 kJ. Последовательно с ЭДПЛ включена увеличивающая период нагрева индуктивность ~ 25 mH. Схема синхронизации и система измерений подробно описаны в [4].

Как уже отмечалось, рассматриваемая в настоящей работе импульсно-проточная система нагрева имеет ряд особенностей. Среди наиболее заметно влияющих на режим работы плазмотрона следует назвать существенно переменный расход нагреваемого газа (от 0 до 3 kg/s), широкий диапазон изменения плотности (от 0,03 до 7,5 kg/m^3) и давления (от 0,02 до 7 MPa) за период нагрева.

На рис. 2 приводятся осциллограммы тока **I**, напряжения на дуге **U** и давления в смесительной камере при работе одного **p**с. к 1 и двух **p**с. к 2 плазмотронов. Пунктиром – изменение массового расхода азота **G** при работе сдвоенной плазмотронной установки.

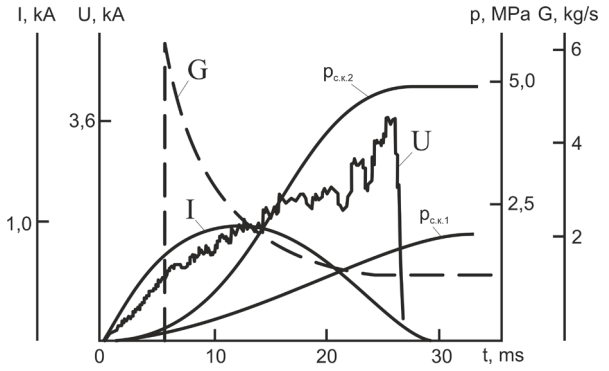


Рис. 2. Осциллограммы тока, напряжения, расхода и давления в смесительной камере

На рис. 3. динамическая вольтамперная характеристика (ВАХ) – мгновенные значения тока и напряжения, изменяющиеся за время нагрева, которое чисто качественно можно разбить на три характерных участка.

Первый – до 6 ms – инициированный искровым поджигом разряд при начальном давлении ~ $3 \cdot 10^3$ Pa. Как показали спектрографические исследования, разряд горит в основном в парах вольфрама, концентрация которых растет по мере прогрева электродов и, судя по СФР-граммам, в течение первых 2–3 ms имеет диффузный характер. К концу участка ток достигает 600 А, ВАХ – растущая. Давление в смесительной камере составляет ~ 0,13 MPa.

Второй участок –6÷12 ms – с поступлением азота с расходом в первый момент до 3 kg/s. Резко увеличивается плотность и давление в электродуговой камере, что вызывает рост сопротивления разряда и дальнейший рост падения напряжения на дуге. Разряд приобретает турбулентный характер. Дуга выносится за пределы дуговой камеры, периодически замыкаясь в минимальном сечении (анодном кольце), о чем свидетельствуют кадры фоторазвертки и появление пульсаций напряжения (рис. 2). Частота пульсаций лежит в пределах 600–1700 Hz. Ток увеличивается до 1000 А, ВАХ – растущая.

Третий участок – 12 ÷ 28 ms – начинает проявляться подпирающее влияние сопловой решетки, установленной на выходе смесительной камеры (расход через ЭДПЛ примерно в 15 раз превышает пропускную способность сопловой решетки). Скорость роста давления достигает максимального за период нагрева значения: в схеме сдвоенной плазмотронной установки – $3{,}6 \cdot 10^2$ MPa/s. Ток плазмотрона, достигнув к 12 ms максимума, начинает уменьшаться по закону LCR – цепи, снижаются вкладываемая в разряд мощность и удельный энерговклад. К концу периода давление в смесительной камере достигает максимального значения, пульсации напряжения имеют минимальную частоту (~ 400 Hz) и максимальную амплитуду. ВАХ приобретает падающий характер (рис. 3).

Анализ динамических вольтамперных характеристик при изменении начального напряжения на конденсаторной батарее U0 от 3,6 до 5,0 kV позволил определить эффективность энерговклада. В области U0=4500 V реализуется близкий к оптимальному с точки зрения согласования емкостного накопителя с нагрузкой режим импульсно-проточного нагрева азота, позволяющий вкладывать в разряд до 86 % запасаемой энергии (рис. 4).

Исходя из выбранного режима работы модельной газодинамической установки разработаны импульсно-проточные подогреватели азота (ЭДПЛ-N_2) с продольно вихревым обдувом.

Время нагрева, s – 0.02 ~ 0.04

Средняя мощность, MW – до 2

Средний массовый расход, kg/s – 0,5 ÷ 1

Среднемассовая температура азота, K – 800 ~ 4000

Давление, MPa –3÷ 7.

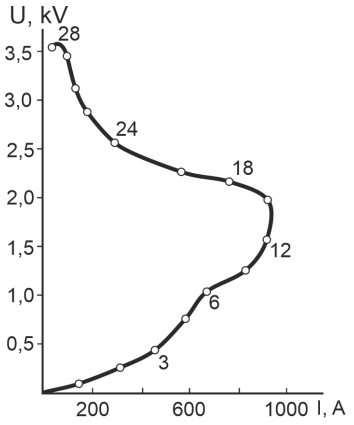


Рис. 3. Динамическая вольтамперная характеристика (цифры вдоль кривой – время в ms от начала разряда)

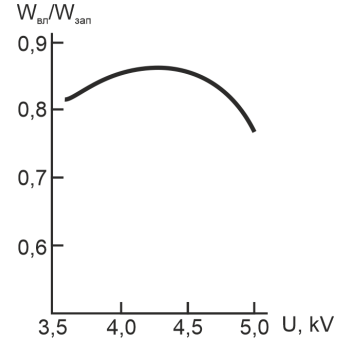


Рис. 4. Зависимость эффективности энерговклада от U_0

Реализован режим согласования емкостного накопителя с электродуговым подогревателем, позволяющий вкладывать в разряд до 86 % запасаемой энергии.

Полученные динамические характеристики плазмотронов, их качественный анализ, а также газодинамические характеристики сверхзвукового потока и результаты экспериментов с генерацией лазерного излучения указывают на возможность использования плазмотронов для повышения эффективности смесительных ГДЛ. Сверхравновесная степень ионизации, поддерживаемая электродуговым нагревом азота, позволяет рассматривать плазмотрон в качестве источника предионизации для быстропроточного и газодинамического с комбинированной накачкой лазеров.

Библиографический список

1. *Абакумов Б. В., Курочкин Ю. В., Пустогаров А. В.* Газодинамический лазер с термически неравновесным электродуговым нагревом рабочего тела // Квантовая электроника. 1979. Т. 6. № 9. С. 1903–1910.

2. *Курочкин Ю. В., Пустогаров А. В., Уколов В. В.* Численное исследование течения и теплообмена в пористом канале плазмотрона // Известия СО АН СССР Серия технических наук. 1978. Вып. 1. № 3. С. 9–15.

3. *Антонов Г. Г., Ковшечников В. Б., Рутберг Ф. Г.* Смесительный газодинамический лазер с неравновесным электродуговым возбуждением // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. Вып. 5. С. 96 – 101.

4. *Антонов Г. Г., Бородин В. С., Братцев А. Н.* Сверхзвуковой импульсно-проточный газодинамический стенд на электродуговых подогревателях // Мощные генераторы низкотемпературной плазмы и методы исследования их параметров. Л.: ВНИИэлектромаш, 1979. 184 с.

5. *Коликов В. А., Богомаз А. А., Будин А. В.* Мощные импульсные генераторы плазмы: Исследование и применение. М.: Наука, 2021. 250 с.

6. *Rutberg P.* Physics and technology of high-current discharges in dense gas media and flows. New York. Nova science publishers, 2009. 214 p.

УДК 62.53 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-140-143**

Ю. А. Ганьшин*
кандидат технических наук, доцент
С. О. Жеребко*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ДЕТЕКТОРЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ УСКОРИТЕЛЯ

Описан исследовательский метод введение эксперимента «PRES», предназначенного для изучения малоуглового рассеяния ep, при котором в конечном состоянии детектируются обе частицы – электрон и протон отдачи. Рассмотрены преимущества этого метода и основные технические элементы ключевых ускорительных детекторов мачты Института ядерной физики Университета Майнца, Германия.
Ключевые слова: *детекторы электронного пучка, пропорциональный счетчик, время проекционная камера, Майнцский ускоритель электронов.*

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

DETECTORS FOR STABILIZATION OF THE ELECTRON BEAM DURING THE PASSAGE OF THE ACCELERATOR

A research method is described for the introduction of the «PRESS» experiment, designed to study the small-angle scattering of ep, in which both particles, an electron and a recoil proton, are detected in the final state. The advantages of this method and the main technical elements of the key accelerator detectors of the mast of the Institute of Nuclear Physics of the University of Mainz, Germany are considered.
Keywords: *Electron beam detectors, proportional counter, time projection camera, Mainz electron accelerator.*

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 так называемых инклюзивных экспериментах, в которых детектировался только рассеянный электрон. В 2015 году группа сотрудников ПИЯФ под руководством проф. 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.

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. Программным Комитетом (PAC) это предложение одобрено с высшим приоритетом. Основной целью эксперимента является измерение зарядового радиуса протона с субпроцентной точностью.

Ключевым элементом эксперимента «PRES» является детектор, состоящий из двух частей: время-проекционной камеры (Time Projecting Chamber, TPC), регистрирующей протоны отда-

чи и прецизионного детектора рассеянных электронов, или переднего трекера (Forward Tracker, FT) [2]–[4]. На рис. 1 схематично представлена структура экспериментальной установки. Электрон рассеивается на протоне в активной мишени – время-проекционной ионизационной камере TPC, заполненной водородом при абсолютном давлении 20 бар. Камера позволяет измерять энергию протона отдачи и координату точки рассеяния вдоль электронного пучка. Координаты треков рассеянных электронов измеряются передним трекером FT, представляющем собой группу пропорциональных камер.

Стандартный пропорциональный счетчик показан на рис. 1*a*. Анод в этой камере выполнен в виде тонкой проволоки, натянутой поперек центра камеры, в то время как стенка цилиндра действует как катод. Такая геометрия обеспечивает более высокую напряженность электрического поля вблизи анодного провода по сравнению с катодом. Эта неравномерность в электрическом поле обеспечивает, среди прочего, лучшую эффективность сбора электронов по сравнению с геометрией параллельных пластин. Напряженность электрического поля при любом радиальном сопротивлении r в таком цилиндре радиуса *b*, имеющем центральный провод радиуса *a*, определяется как

$$E(r) = \frac{1}{r}\frac{Vo}{\ln(b/a)}. \qquad (1)$$

Здесь V0 – приложенное напряжение; *a*, *b* – радиусы анодной проволоки и цилиндра соответственно. Это означает, что напряженность электрического поля в радиальном направлении имеет поведение 1/r (рис 1*b*, *c*) [1].

Тонкий центральный провод действует как анод, внешняя стенка – как катод.

Конструктивный общий вид центрального детектора представлен на рис. 2. Комбинация измерений позволяет восстановить полную кинематику упругого рассеяния электрона на протоне. Проект предполагает измерение дифференциального сечения упругого рассеяния электрон-протон в диапазоне переданных импульсов $0{,}001\ \text{ГэВ}^2 < Q^2 < 0{,}04\ \text{ГэВ}^2$ с относительной точностью 0,1 % и абсолютной – 0,2 %. Эти измерения позволяют вычистить зарядовый радиус протона с точностью лучше процента.

Абсолютные измерения упругого ер-рассеяния требуют измерения потока налетающих электронов с точностью лучше 0,1 %. Соответствующая система мониторирования пучка в эксперименте «PRES» будет состоять из сцинтилляционных счетчиков, которые позволяют определять точное количество электронов, прошедших через детектор и ионизационной камеры, измеряющей средний ток пучка. Конструктивный общий ионизационной камеры для мониторирования пучка представлен на рис. 3–4.

Основной проблемой абсолютного мониторирования пучка является то, что при предполагаемых скоростях счета электронов (2–2,5 МГц) в сцинтилляционных счетчиках возникают наложения импульсов, вследствие чего два пришедших электрона регистрируются электроникой как один.

Соотношение между измеренным и реальным количеством электронов можно представить следующим выражением:

$$N_meas = N_real\,(1 - \tau N_real), \qquad (2)$$

где – измеряемая скорость счета; – реальная скорость счета; τ – временное расстояние между двумя импульсами, когда они начинают разделяться электроникой.

Так, при запланированном потоке 2 МГц и τ=5 нс, количество ожидаемых просчетов будет достигать 1 %. Соответственно, необходимо вводить поправку на число просчетов с точностью не хуже 10 %. В эксперименте «PRES» эта поправка будет определяться с помощью специальной ионизационной камеры, регистрирующей пучок электронов одновременно со сцинтилляционными счетчиками. Поправка на вероятность просчетов будет получена из сравнения скорости счета счетчиков с током ионизационной камеры в зависимости от варьируемой интенсивности пучка электронов. При этом используется тот факт, что ток в ионизационной камере строго пропорционален интенсивности пучка.

Стабилизация положения электронного пучка будет осуществляться на основе монитора положения пучка, расположенного за основным детектором. Монитор состоит из четырех пропорциональных камер (две плоскости X и две – Y). Анодные плоскости камер изготовлены из золоченой проволоки диаметром 30 мкм с шагом 2 мм. Катоды камер гладкие из фольгированного стеклотекстолита толщиной 200 мкм (толщина фольги 50 мкм). Расстояние между анодной и катодной плоскостью 2,5 мм. В каждой из четырех камер инструментированы восемь центральных проволочек. Апертура камер выбрана равной 40 x 40 $мм^2$, чтобы пучок проходил через камеры с минимальными искажениями. На камеры подавалось высокое напряжение -1,8 кВ. Использовалась газовая смесь Ar+30 % CO2. Для отладки этой части детектора и измерения точности монитора пучка была собрана установка, состоящая из пропорциональных камер и коллимированного источника ^{90}Sr (β- 545.

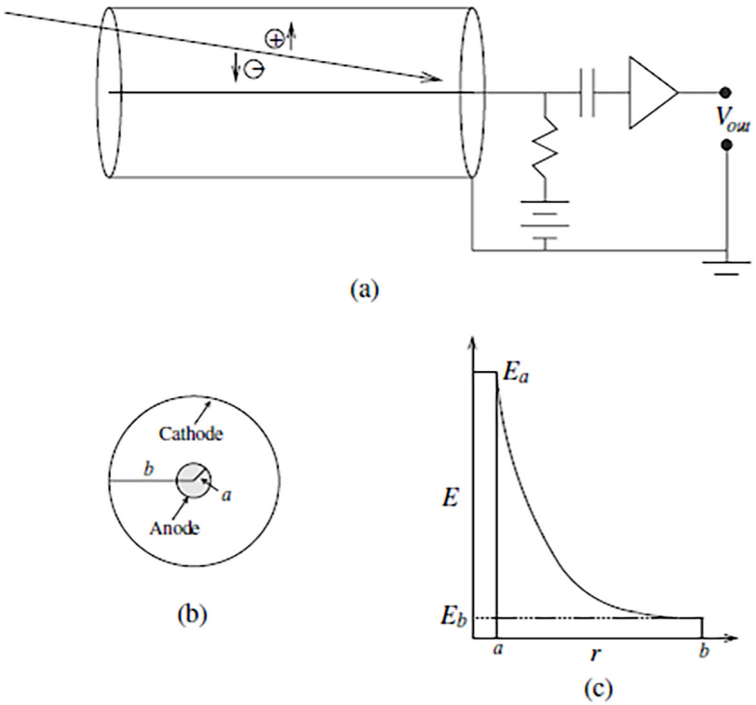


Рис. 1: a – схема цилиндрического пропорционального счетчика; b – вид в поперечном сечении цилиндрического пропорционального счетчика; c – профиль напряженности радиального электрического поля внутри цилиндрической камеры

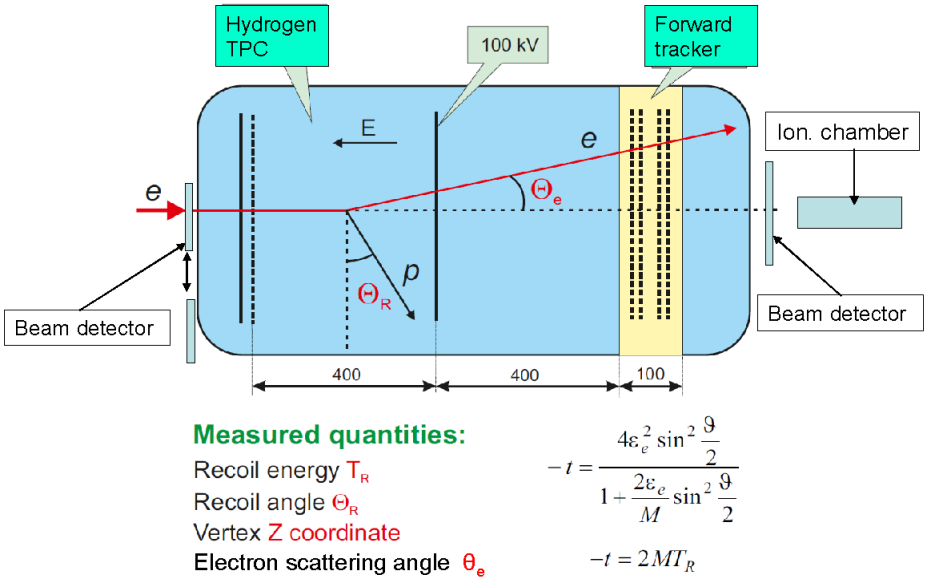


Рис. 2. Схема эксперимента «PRES»

9 кэВ) на перемещающем устройстве (цена деления 25 мкм). Парметры коллиматора (диаметр 3 мм и расстояние до пропорциональных камер) выбирались так, чтобы распределение профиля пучка по координате в пропорциональных камерах было близко к смоделированному пучку. 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, после преобразования и усиления оцифровываются контроллером DAQ321 (рис. 5). Программа на компьютере каждые 300–500 мс считывает все

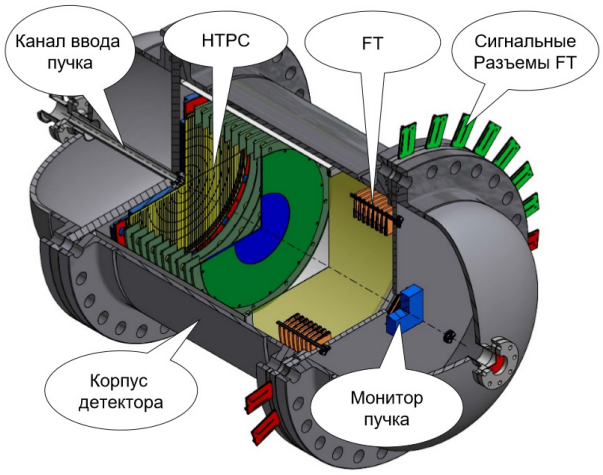


Рис. 3. Схема центрального детектора эксперимента «PRES»

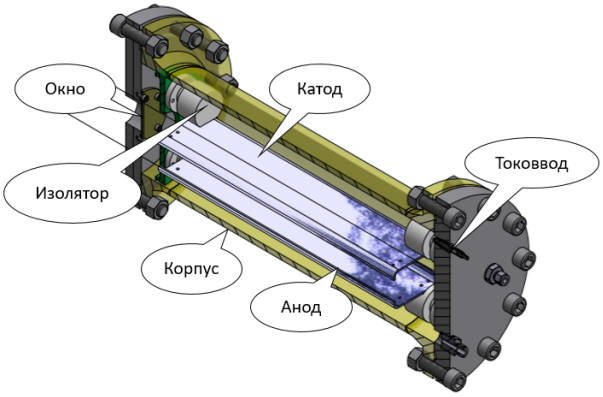


Рис. 4. Схема ионизационной камеры для мониторирования электронного пучка

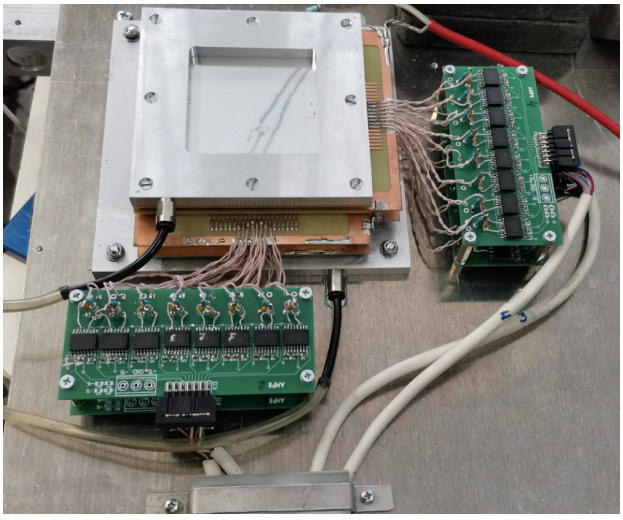


Рис. 5. Сборка пропорциональных камер с полным комплектом электроники

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.

Результаты обработки калибровочных измерений можно признать вполне хорошими. С помощью фитирования сигнала гауссианой можно получить абсолютное положение пучка с погрешностью порядка 70 мкм. Для стабилизации положения пучка целесообразно использовать метод усреднения, поскольку он проще в реализации, а значит, его можно запрограммировать в контроллере и сделать систему стабилизации пучка, не зависящей от компьютера. Чувствительность относительных измерений не превышает 20 мкм. Однако для получения абсолютного положения пучка метод усреднения использовать сложно, поскольку линейный коэффициент калибровки зависит от ширины пучка (RMS=6 % вместо RMS=0,8 % для фитирования гауссом).

Библиографический список

1. Syed Naeem Ahmed. Physics & Engineering of Radiation Detection / Academic Press is an imprint of Elsevier, 2007. P. 168–182, 978-0-12-045581-2.
2. *Burq J.* Nucl. Phys. B 217, 285 (1983).
3. *Dobrovolsky A.* Nucl. Phys. A 766, 1 (2006).
4. *Andreev V.* Phys. Rev. Lett.110, 022504 (2013).

УДК 537.523/.527, 533. 9:51-73, 621.039.6

В. В. Кузенов*,**,***
доктор физико-математических наук, профессор
П. Д. Бросин*
магистрант
С. В. Рыжков*
доктор физико-математических наук, профессор
**Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана*
***Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова*
****Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ И УДАРНЫХ ВОЛН

Рассмотрены разные подходы к нагреву плазму, которые (увеличение мощности разряда, а также плазменной температуры и магнитной индукции) ведут к тому, что качественно изменяются структура и параметры электроразрядной плазмы. Кроме того, радиационные магнито-плазмодинамические эффекты усиливаются. Создана численная методика, которая используется в данной работе, в частности, для расчета плазмодинамического режима нагрева. Изучены особенности формирования спектра ультрафиолетового излучения. Рассчитаны теплофизические параметры плазмы. Далее обнаружено – интенсивность ультрафиолета имеет максимальное значение во взрывном режиме разлета плазмы. Найдена область данного разряда и окружающей его среды, где импульс отдачи, переданный диэлектрической преграде плазменного облака, имеет максимальное значение.
Ключевые слова: *высокая температура, математическое моделирование, плазмодинамический разряд.*

V. V. Kuzenov*,**,***
Dr. Sc. Phys.-Math., Professor
P. D. Brosin*
Graduate Student
S. V. Ryzhkov*
Dr. Sc. Phys.-Math., Professor
**Bauman Moscow State Technical University*
***Dukhov Automatics Research Institute*
****Ishlinsky Institute for Problems in MechanicsRAS*

NUMERICAL MODELING OF ELECTRIC-DISCHARGE SOURCES OF RADIATION OF HIGH SPECTRAL BRIGHTNESS AND SHOCK WAVES

Various approaches to plasma heating are considered, which (an increase in the discharge power and, consequently, the temperature of the plasma and magnetic field) leads to an increase in the radiation-magneto plasma-dynamic effects, which cause a qualitative change in the structure and parameters of the electric-discharge plasma. A numerical technique has been developed, which is used in this work, in particular, for calculating the plasma-dynamic heating of plasma. General physical and mathematical formulations of problems of numerical modeling of radiation-plasma-dynamic processes in high-current pulsed electric discharge systems are presented. Thermal physical parameters of plasma have been calculated The features of the formation of the spectrum of ultraviolet radiation were studied. It found that intensity of such radiation generated by the vapor layer in the total light flux emerging from the shock wave boundary of the discharge is maximum in the explosive regime. The region of the discharge and the environment is found, where the recoil momentum transferred to the plasma dielectric barrier has a maximum value.
Keywords: *high temperature, mathematical model, plasma dynamic discharge.*

В данной работе теоретически и численно моделируются импульсно-периодические источники ударных волн и мощного излучения на примере сильноточных излучающих разрядов. Такие источники излучения плазмы высокой яркости и генераторы ударных волн могут быть использованы для формирования системы высокоскоростных плазменных струй, предназначенных для обжатия замагниченной мишени в термоядерных системах и установках высокой плотности энергии, а также в медицинском оборудовании и энергоустановках [1]–[12].

Представлена 2D физико-математическая модель импульсных электроразрядных источников и численная методика расчета свойств (оптических и термодинамических) плазмы, которая содержит несколько компонентов.

В работе отмечается высокая точность результатов, получаемых с использованием модифицированного метода Глимма и метода Годунова-Колгана. Газодинамическая часть двумерных уравнений радиационной магнитно-газовой динамики тестировалась на задаче о сильном взрыве без противодавления. Результаты расчетов сравнивались с аналитическим решением [13]. Отмечено хорошее соответствие (примерно 10 % точности) полученных теоретических (рассчитанных одномерных и двумерных случаев) значений и экспериментальных данных полного тока и положения ударно-волновой границы разряда для разных режимов мощности и энергии в зависимости от времени.

Во второй части выполнен численный анализ взаимодействия плазменных струй и поведения сильноточного импульсного поверхностного разряда в различных режимах (взрывной, магнито-газодинамический и квази-пинчевый). В ходе этой работы проведено теоретическое изучение плазмы сильноточного поверхностного разряда, которое базируется на основе многомерной математической модели, разработанной авторами данной публикации. Радиационные магнито-плазмодинамические процессы исследуются перпендикулярно поверхности диэлектрической вставки. Новая модель и численная методика разработаны авторами с учетом межэлектродной вставки (МЭВ) и внешнего магнитного поля. Проводится сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными.

В [4] приведены результаты тестовых расчетов газодинамической части одномерной системы уравнений РМГД на примере решения одномерной задачи о распространении ударной волны в трубе с начальными условиями $\rho_1 = 1$, $p_1 = 1$, $V_1 = 0$ и $\rho_2 = 0{,}125$, $p_2 = 0{,}1$, $V_2 = 0$. В вычислениях полагалось γ=1,4 и Δx=0,01.

Результаты расчетов сравнивались с аналитическим решением [14]. Безразмерные начальные параметры идеального газа в расчетах были следующие: $\rho = 1$, $p = 1000$, $u = v = 0$. Расчеты проводились в цилиндрической системе координат на двумерных сетках размером 50×50, 100×100 и 120×120. Начальная область взрыва занимала 4×4 ячеек. Амплитуда колебаний <1 %, что вполне приемлемо при расчетах.

В качестве двумерного тестового примера радиационно-магнитной части системы РМГД рассматривалась задача

$$\sum_{\alpha=1}^{2} (a_\alpha(x_1, x_2) y_{\bar{x}_\alpha})_{x_\alpha} - d(x_1, x_2) y = -f(x_1, x_2),$$

где y=0 – на границе расчетной области G.
определенную на равномерной сетке $h_1 = h_2 = h = 1/N$ в единичном квадрате. Коэффициенты $a_1(x_1, x_2)$ и $a_2(x_1, x_2)$ выбираем следующим образом:

$$a_1(x_1, x_2) = 1 + c_0\left[(x_1 - 0{,}5)^2 + (x_2 - 0{,}5)^2\right]$$

$$a_2(x_1, x_2) = 1 + c_0\left[0{,}5 - (x_1 - 0{,}5)^2 - (x_2 - 0{,}5)^2\right],$$

где c_0 – константа. Для модифицированного попеременно-треугольного метода и разностной схемы заданы условия начального состояния в виде $y(t = 0, x_1, x_2) = 0$.

Кроме того, изучены особенности формирования спектра ультрафиолетового излучения. Обнаружена область разряда и окружающей среды с максимальным импульсом отдачи от диэлектрической преграды к плазме. Обсуждается возможность применения данного класса разрядов для создания высокоскоростных импульсных струй плазмы, а также в установках магнитно-инерциального термоядерного синтеза и системах генерации частиц для различных инженерных приложений, включая космическую технику.

Библиографический список

1. *Бугримов С. Н., Камруков А. С., Кашников Г. Н.* Высокояркостный импульсно-периодический источник УФ излучения на основе линейно-стабилизированного поверхностного разряда // Квантовая электроника. 1986. Т. 13. № 1. С. 76–85.

2. *Камруков А. С., Козлов Н. П., Протасов Ю. С.* Высокояркостные источники теплового ВУФ излучения на основе плазмодинамических МПК-разрядов в газах // ТВТ. 1989. Т. 27. С. 152–170.

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. *Гришин Ю. М., Козлов Н. П., Кузенов В. В.* О модификации метода Глимма для решения уравнений газовой динамики // ЖВМ и МФ. 1994. Т. 34. С. 1489.

5. *Кузенов В. В., Рыжков С. В., Фролко П. А.* Математическая модель импульсного плазменного двигателя с предионизацией геликонным разрядом // Труды МАИ. 2015. № 82.

6. *Ryzhkov S., Kuzenov V.* Analysis of the ideal gas flow over body of basic geometrical shape // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 132. P. 587–592.

7. *Клименко Г. К., Кузенов В. В., Ляпин А. А.* Расчет, моделирование и проектирование генераторов низкотемпературной плазмы: учебник. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. 264 с.

8. *Ryzhkov S., Kuzenov V.* New realization method for calculating convective heat transfer near the hypersonic aircraft surface // ZAMP. 2019. Vol. 70. P. 46.

9. *Гришин Ю. М., Козлов Н. П., Кузенов В. В.* Об эффекте деградации УВ в сильноточных излучающих разрядах в газах атмосферного давления // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. С. 71–75.

10. *Гришин Ю. М., Козлов Н. П., Кузенов В. В.* Об особенностях спектрально-яркостных характеристик импульсных излучающих поверхностных разрядов в плотных газах // ТВТ. 1998. Т. 36. С. 187–193.

11. *Kuzenov V., Ryzhkov S.* The Qualitative and Quantitative Study of Radiation Sources with a Model Configuration of the Electrode System // Symmetry. 2021. Vol. 13 (6). P. 927.

12. *Kuzenov V., Ryzhkov S.* Numerical Simulation of Pulsed Jets of a High-Current Pulsed Surface Discharge // Computational Thermal Sciences. 2021. Vol. 13. P. 45–56.

13. *Pillai S., Hackam R.* Surface flashover of solid insulators in atmospheric air and in vacuum // Journal of Physics. 1985. Vol. 58(1). P. 146–153.

14. *Седов Л. И.* Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. 438 с.

УДК 004. 94 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-147-151**

И. А. Салова*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭКРАН ТЕХНИЧЕСКОГО СРЕДСТВА

В работе рассмотрена методика анализа, результаты расчетной оценки при воздействии импульсного магнитного поля. Особое внимание уделено заданию параметров импульса в программном комплексе ELCUT.
Ключевые слова: *импульсное магнитное поле, моделирование, метод конечных элементов.*

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

SIMULATION OF A PULSED MAGNETIC FIELD IMPACT ON THE DEVICE SCREEN

The paper considers the method of analysis, the results of the calculated evaluation under the influence of a pulsed magnetic field. Special attention is paid to setting the pulse parameters in the ELCUT software package.
Keywords: *pulsed magnetic field, simulation, finite element method.*

Обычно на стадии испытаний техническое средство (ТС) подвергают воздействию трех видов внешнего магнитного поля: постоянного, импульсного и синусоидального. Каждое из вышеперечисленных, воздействующее на исследуемое ТС, может влиять на его качество функционирования. Испытания имеют целью подтвердить устойчивость ТС к магнитным полям в определенных условиях эксплуатации или при определенных условиях установки. Для оценки влияния магнитного поля на стадии проектирования ТС, то есть априори необходимо моделирование, в результате которого можно оценить, как влияние внешних магнитных полей на выходные параметры проектируемого устройства, так и влияние магнитных полей, создаваемых самим устройством. По результатам моделирования можно предусмотреть конструктивные изменения и дополнительное экранирование ТС. Для моделирования весьма эффективным является метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе ELCUT [1]. В [2], [3] проводилось моделирование и оценка влияния постоянного и синусоидального внешнего магнитного поля на электромеханические устройства. В данной работе рассматривается процесс моделирования импульсных магнитных полей в программном комплексе ELCUT.

Моделирование в общем случае состоит из трех этапов [4]:

– создание геометрической модели устройства, размещаемого в исследуемой области распространения внешнего электромагнитного поля (ВЭП);

– задание ВЭП требуемого вида и напряженности в исследуемой геометрической области размещения проектируемого ТС;

– численный итерационный анализ параметров и характера распределения электромагнитного поля внутри и по толщине экранирующего корпуса устройства во взаимосвязи со свойствами его материала и геометрии.

Пример исследуемой геометрической области размещения и геометрической модели корпуса ТС в виде цилиндра приведен на рис. 1, где t – толщина корпуса ТС (t=5 мм); R и h – соответственно радиус основания и высота корпуса ТС (R=55 мм h=110 мм). Граница принятой геометрической области электромагнитного поля обозначена 1. Линии a и b предназначены для измерения напряженности магнитного поля внутри ТС.

В соответствии с ГОСТ 30336-95 (МЭК 1000-4-9-93) «Устойчивость к импульсному магнитному полю» [5] различают 5 степеней жесткости испытаний изделий на устойчивость к воздействию импульсного магнитного поля (ИМП). Испытания на устойчивость к ИМП со степенями жесткости 1 и 2 не проводятся; 3-я степень жесткости соответствует пиковому значению напряженности магнитного поля в 100А/м; 4-я

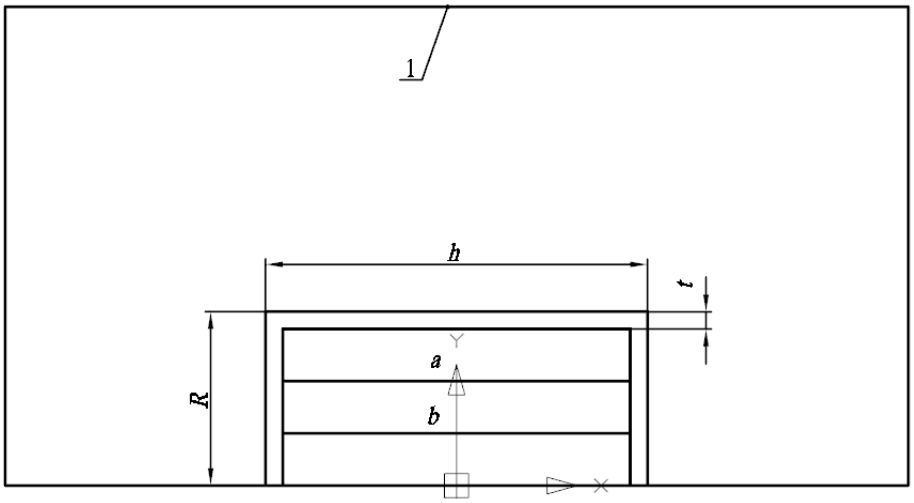


Рис. 1. Геометрическая область размещения и геометрическая модель ТС

и 5-я степени – соответственно 300 и 1000А/м. Степень жесткости испытаний устанавливают исходя из условий эксплуатации ТС и окружающей электромагнитной обстановки в соответствии с техническими требованиями.

На рис. 2 показана форма импульса магнитного поля для проведения испытаний ТС.

В точности воспроизвести форму импульса, приведенного на рисунке, средствами ELCUT невозможно. Поэтому нужна аппроксимация. Полагаем, что фронты нарастания и спада импульса происходят по линейному закону. Из рис. 2 следует, что достижение максимума напряженности происходит через 8 мкс после начала действия импульса, а окончание импульса – через 32 мкс. На рис. 3 представлена аппроксимация формы ИМП. Максимальное значение ИМП соответствует 5-й степени жесткости испытаний ТС на устойчивость к воздействию ИМП.

Граничное условие задается на цилиндрической поверхности 1 (рис. 1). Для задания граничного условия, описывающего форму импульса, в ELCUT предусмотрены встроенные функции. Наиболее подходящей является функция *impulse*(*t*, *a*, *b*), представляющей отрезок ступенчатой функции. Функция принимает значение 1, когда первый ее аргумент лежит на отрезке, концы которого определяют второй и третий аргументы, и принимает значение 0 в остальных случаях. На линейной части фронта нарастания импульса изменение напряженности происходит по линейному закону $H_t=k\cdot t$. В момент времени t_1 $H_t=H_{max}$=1000А/м. Тогда коэффициент $k=H_{max}/t_1=1000/8e^{-3}=125000$ А/(м·с). Для описания фронта нарастания импульса можно использовать формулу $H_t=k\cdot t\cdot impulse(t,\ 0,\ t_1)$ или для данного примера $H_t=125\ 000\cdot t\cdot\ impulse(t,0,8e^{-3})$. Для описания спада импульса используется формула $H_t=k_1\cdot(T-t)\ impulse(t,\ t_1,\ T)$. В момент времени t_1 $H_t=H_{max}$=1000 А/м. Тогда $k_1=H_{max}/(T-t_1)$, или для данного примера $k_1=1000/24e^{-3}=41666{,}666$ А/(м·с). Итоговая формула для описания импульса на рис. 3 выглядит как $H_t=125000\cdot t\cdot impulse(t,0{,}8e^{-3})+41666{,}666\cdot(32e^{-3}-t)\ impulse(t,8e^{-3},32e^{-3})$.

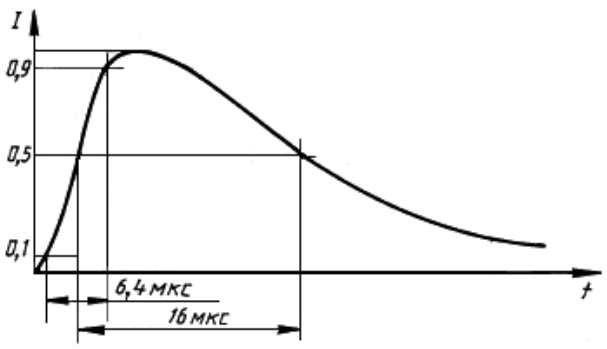


Рис. 2. Форма импульса магнитного поля в соответствии с ГОСТ 30336-95

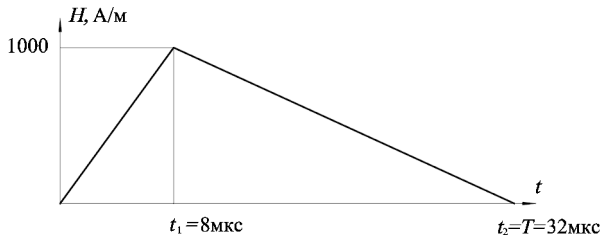


Рис. 3. Аппроксимация формы импульса магнитного поля

Для проверки правильности конструирования формулы на сайте разработчиков ELCUT имеется бесплатная утилита для визуализации формул. На рис. 4 представлен скриншот с визуализацией итоговой формулы для описания импульса магнитного поля.

Как следует из рис. 4, при спаде импульса достижение 50 % напряженности магнитного поля происходит при 20 мкс, что соответствует рис. 2.

Для моделирования использована задача нестационарного магнитного поля с учетом электрической схемы. Электрическая схема необходима для учета вихревых токов в стальном корпусе ТС и представляет собой короткозамкнутый корпус. Вначале решается нелинейная магнитостатическая задача при отсутствии внешнего аксиального импульсного поля (H=0 А/м). В результате получается распределение индукции по всему объему ТС. Этот результат передается в задачу нестационарного магнитного поля в качестве начальных условий. Далее производится моделирование внешнего аксиального магнитного поля с максимальной напряженностью, например, H_{max}=1000 А/м при отсутствии ТС. В результате моделирования подбирается коэффициент K_0 в выражении для граничного условия 1, представляющего произведение магнитного потенциала A_0 на радиус (rA_0). На рис. 5 в качестве примера показано распределение напряженности магнитного поля вдоль контуров a и b (рис. 1). Затем решается задача нестационарного магнитного поля, в которой учитываются магнитные свойства (кривая намагничивания) корпуса ТС. В качестве граничного условия используется выражение

$$K_0/H_{max}\cdot(125000\cdot t\cdot impulse(t,0{,}8e^{-3}) + \\ + 41666{,}666\cdot(32e^{-3} - t)\, impulse(t,8e^{-3},32e^{-3})).$$

Для учета поверхностного эффекта (скин эффекта) программой следует построить мелкую сетку конечных элементов в поверхностной области корпуса ТС. Для этого следует рассчитать глубину проникновения δ для заданного материала корпуса:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \gamma}},$$

где γ – электропроводность, См/м; f – частота, Гц; μ – относительная магнитная проницаемость материала; μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость вакуума.

Максимальный размер сетки в поверхностной области корпуса не должен превышать рассчитанного значения δ.

Приведенные ниже результаты моделирования получены при задании материалу корпуса свойств стали 1211. На рис. 6 показано распределение внешнего импульсного магнитного поля внутри и вне ТС в момент достижения максимума напряженности (t=8 мкс).

На рис. 7 показано распределение напряженности внутри ТС вдоль контура a в момент времени t=8мкс, а на рис. 8. графики изменения напряженности в зависимости от времени действия ИМП в двух точках контура a.

Таким образом, при проектировании ТС с помощью метода конечных элементов и программного комплекса ELCUT можно:

– установить уровень магнитных помех, возникающих внутри ТС и выявить наиболее уязвимые места установки чувствительных элементов в нем;

– своевременно принять меры к изменению конструкции экрана с целью подавления внешних помех.

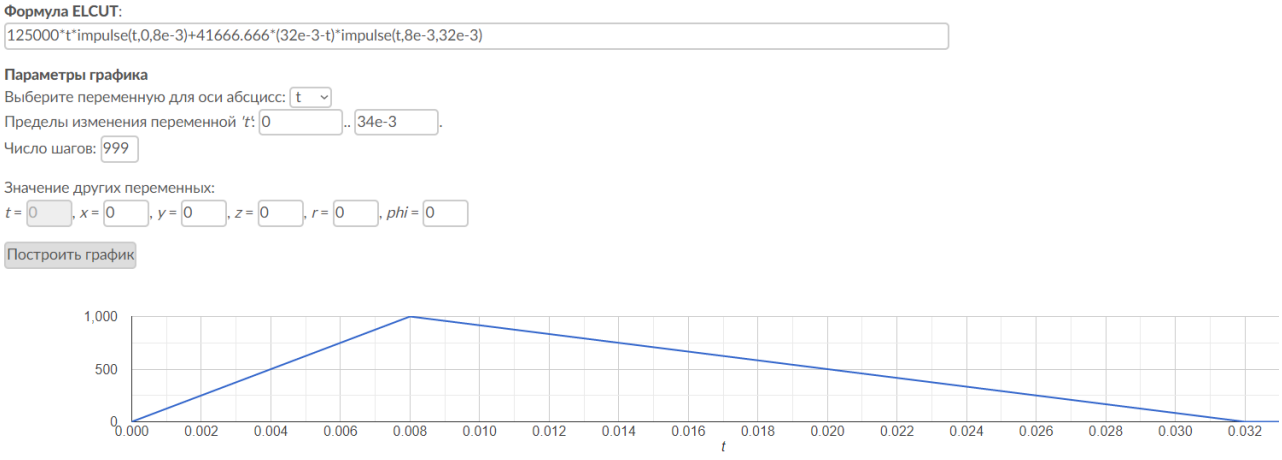


Рис. 4. Визуализация итоговой формулы для описания импульса магнитного поля

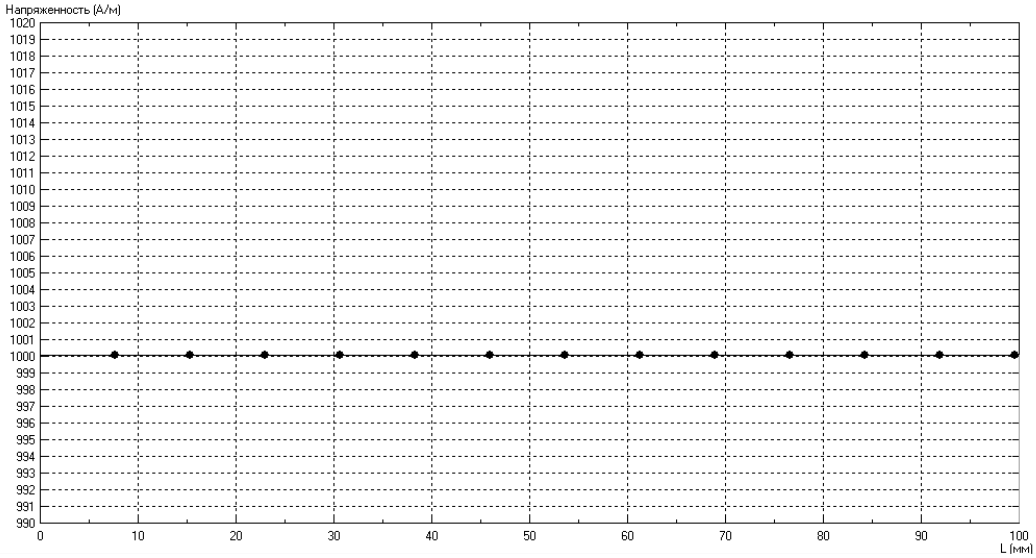


Рис. 5. Максимальная напряженность заданного внешнего магнитного поля

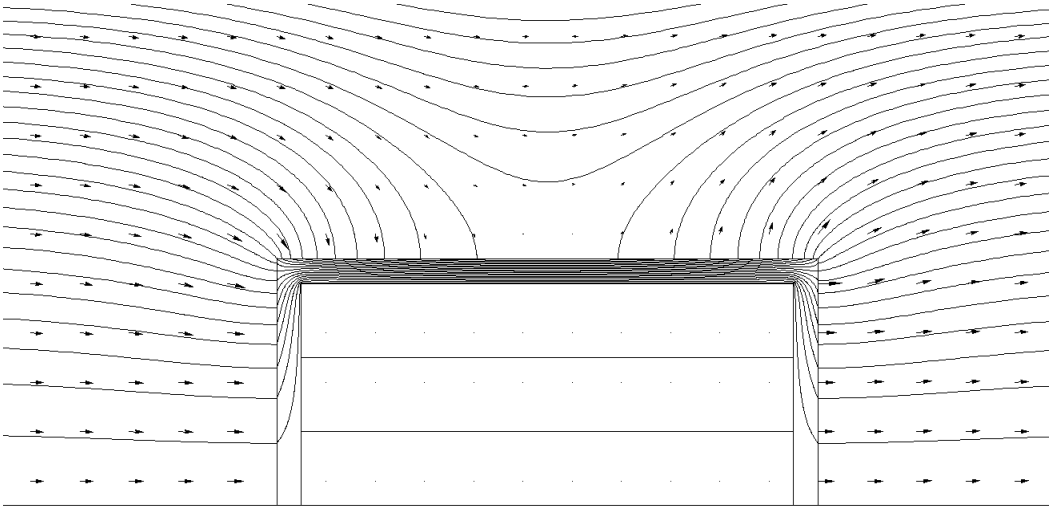


Рис. 6. Распределение внешнего импульсного магнитного поля в момент времени t=8 мкс

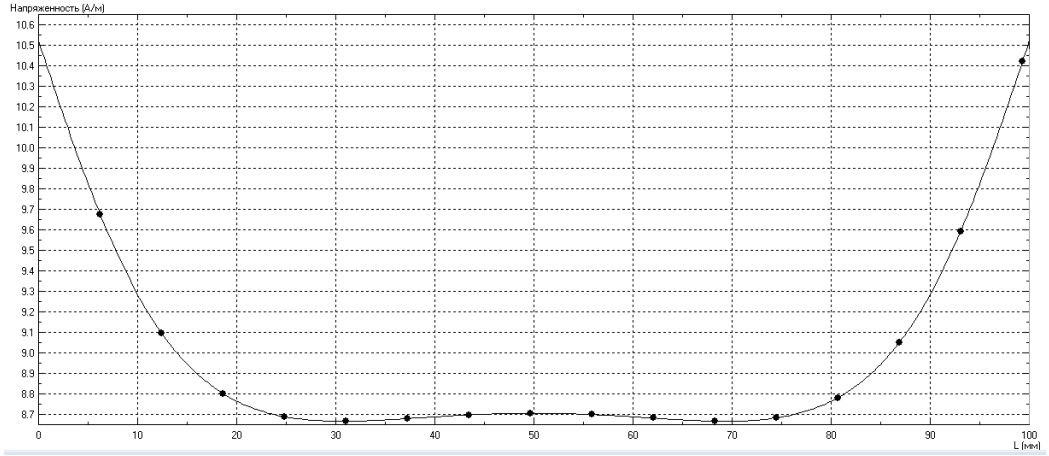


Рис. 7. Распределение напряженности вдоль контура a в момент времени t=8 мкс

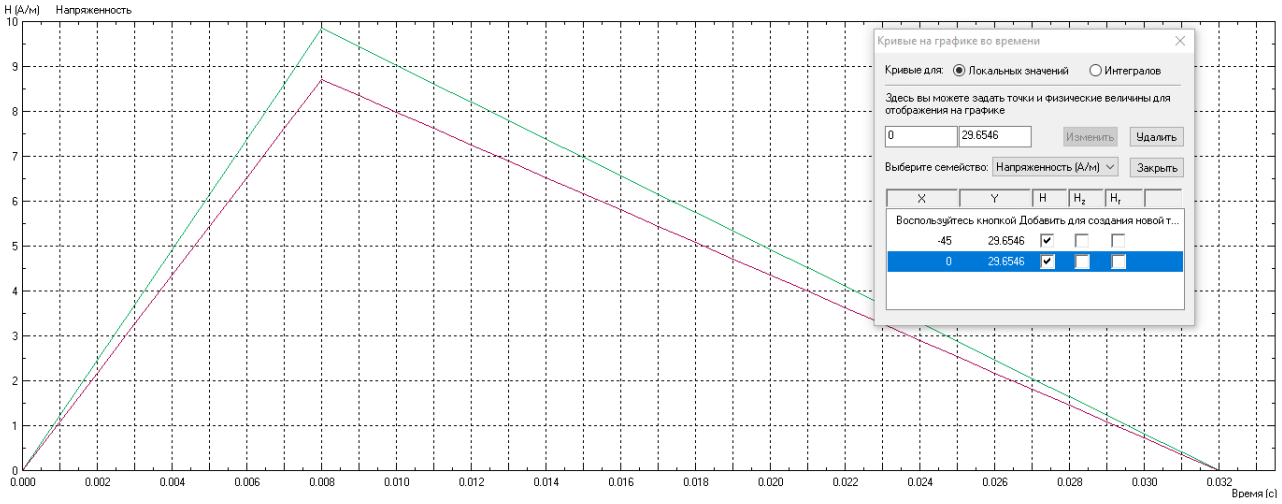


Рис. 8. Распределение напряженности вдоль контура а в момент времени t=8 мкс

Библиографический список

1. ELCUT v.6.3. Комплекс программ для моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач. Руководство пользователя. СПб.: Производственный кооператив ТОР, 2016.

2. *Епифанов О. К., Салова И. А.* Анализ и оценка факторов, определяющих точность результатов компьютерного моделирования экранирующих свойств корпусов устройств // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 2. С. 332–339.

3. *Салова И. А., Епифанов О. К.* Исследование устойчивости индукционных устройств к внешним электромагнитным полям и радиочастотным помехам // Завалишинские чтения ’13: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2013. С.121–126.

4. *Епифанов О. К., Салова И. А.* Моделирование и оценка электромагнитной устойчивости электромеханических устройств к электромагнитным полям и помехам методом конечных элементов // Материалы XXIX научно-технической конф. памяти Н. Н. Острякова. СПб., 2014. С. 398–402.

5. ГОСТ 30336-95(МЭК 1000-4-9-93). Устойчивость к импульсному магнитному полю.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 53.083

А. П. Бобрышов*
аспирант, ассистент
В. П. Кузьменко*
аспирант, старший преподаватель
С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИДОВ И СХЕМ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ПОВЕРКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Проведение поверки измерительных устройств является важнейшим мероприятием для обеспечения корректного функционирования различного рода установок. Они производятся от начала сборки средств измерения (СИ) до их полного выведения из строя или замены на более новое оборудование. В данной статье рассмотрены существующие методы для осуществления поверки электрических контрольно-измерительных приборов (КИП). Рассмотрены виды поверок СИ разновидности и описаны их особенности. Исследованы схемы осуществления аттестации, а также правило составления нормативных документов и правил. Из всех рассмотренных требований осуществления поверки выделена проблема, связанная со степенью автоматизации.
Ключевые слова: *средство измерений, контрольно-измерительный прибор, метод поверки, погрешность, эталон, степень автоматизации, государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ), ГОСТ.*

A. P. Bobryshov*
PhD Student, Assistant
V. P. Kuzmenko*
PhD Student, Senior Lecturer
S. V. Solyonyi*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

STUDY OF TYPES AND SCHEMES OF VERIFICATION OF ELECTRICAL CONTROL AND MEASURING DEVICES

Verification of measuring devices is the most important measure to ensure the correct functioning of various types of installations. They are produced from the beginning of the assembly of measuring instruments (SI) to their complete disabling or replacement with newer equipment. This article discusses the existing methods for the verification of electrical instrumentation (I&C). The types of verifications of SI varieties are considered and their features are described. The schemes for the implementation of certification, as well as the rule for compiling normative documents and rules, were studied. Of all the considered requirements for the implementation of verification, the problem associated with the degree of automation is highlighted.
Keywords: *measuring instrument, measuring device, verification method, error, standard, degree of automation, state system for ensuring the uniformity of measurements (GSI), GOST.*

Введение

Поверкой СИ называется комплекс операций, производимых с целью подтверждения соответствия средств измерений метрологическим требованиям. Согласно федеральному закону «Об обеспечении единства измерений» № 102-ФЗ от 26.06.2008 под метрологическими требованиями понимается обеспечение единого регламента, влияющего на результат и показатели точности измерений, согласно которым будет проводится аттестация СИ, а также к условиям, при которых будут выполняться данные правила. Для этого должны быть обеспечены: обязатель-

ные метрологические требования, установленные нормативными правовыми актами предприятия, ведомства, страны или совокупности стран, на территории которых будут производиться поверки КИП. Данные правила будут розниться в зависимости от типа устройства, метода осуществления поверки [1], его алгоритма и нормативных правил проводимой аттестации.

Виды поверок СИ

Существует несколько видов поверки КИПов, отличающихся друг от друга различными характеристиками или областями воздействия. На рис. 1 представлена структурная схема видов поверок СИ.

Из рисунка видно, что в основном поверка делится на шесть основных видов. Разделение по цели подразумевает определение, какую именно поверку необходимо произвести КИПу. То есть необходимо осуществить определение погрешности устройства, или определить перечень поправок необходимых для внесения в СИ. Разделение по принадлежности к метрологической службе означает принадлежность организации, которая осуществляет поверку. Осуществлением подобного рода услуг может заниматься не только государственные учреждения, но и юридические лица или индивидуальные предприниматели, при этом последние должны иметь аккредитацию, разрешающую проведение аттестации КИП [1]. Государственные учреждения являются юридически главнее организаций, имеющих разрешение на исполнение поверки, но между входящими в структуру Ростандарт государственными организациями, главенствующих различий не устанавливается, то есть государственные научно-метрологические институты и государственные региональные центры метрологии являются юридически равными организациями в области осуществления поверки. По способу проведения проверки делятся на *комплексные* и *поэлементные*.

Первые подразумевают, что СИ поверяют в условиях реальной эксплуатации в полном комплекте всех составных частей, что позволяет определить не только погрешность или правки, но и дефекты, связанные с монтажом или проблемами с коммутацией.

Вторые подразумевают поверку всех частей по отдельности. Определяется погрешность каждого элемента и позже производится расчет устанавливающий общую погрешность. Данный метод чаще всего используют для поверки сложных конструкций. Разделение по степени автоматизации подразумевает осуществление поверки различного числа СИ. В том случае, когда необходимо поверить большое число КИПов, используются мехатронные системы и специализированное оборудования, исключая участие человека. Такая аттестация носит название автоматической. К неавтоматическим относятся процедуры проверки КИПов с полным или частичным участием человека. В зависимости

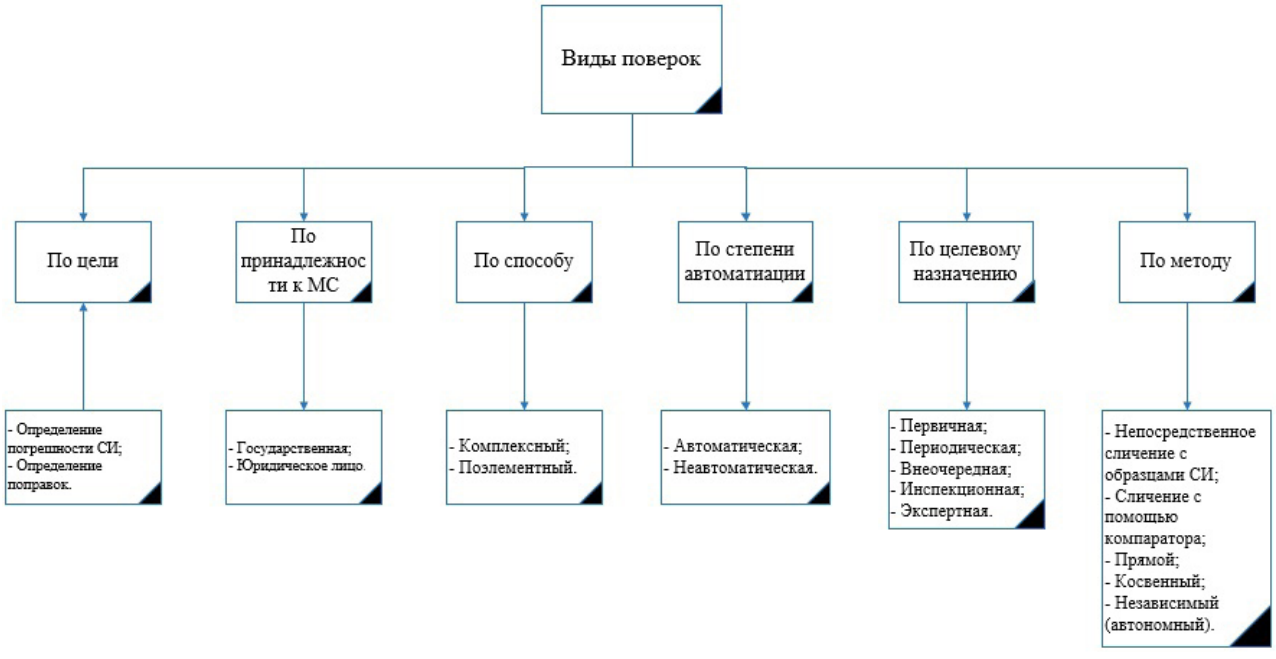


Рис. 1 Структурная схема видов поверок

от целевого назначения проверки делятся на *первичные*, *периодические*, *внеочередные*, *инспекционные* и *экспертные* [1].

Под первичной поверкой подразумевается аттестация при выпуске оборудования с производства или после его ремонта. В случае импорта данная поверка не будет производится, если ввозимое оборудование имеет международное соглашение о признании результатов поверки на произведенные устройства. Периодическую поверку через определенный интервал времени осуществляют по оборудованию, находящемуся на длительном хранении или эксплуатации. Изначальный интервал поверки устанавливают после выпуска и утверждении СИ, последующие интервалы определяются в зависимости от результатов проведения аттестации. К внеочередным относят поверки, проводимые для полностью рабочих устройств при повреждении пломбы, утраты документов устройства, необходимости утверждения исправности СИ при изменении условий эксплуатации или корректировки межповерочного интервала [1]. Для проведения государственного надзора или контроля юридических лиц и индивидуальных предпринимателей осуществляющих предоставление услуг поверки существует инспекционная поверка. Данная проверка производится по письменному требованию в случае возникновении спорных моментов, связанных с проведением аттестации оборудования. По методам поверки делятся на несколько типов. Измерение величины при отсутствии прибора сравнения или компаратора происходит обычное сличение данных измерений КИП с эталонным устройством. Сравнение СИ с рабочим эталонным при помощи компаратора [2]. Еще одним методом поверки является измерение поверяемым устройством величины, которая воспроизведена рабочим эталонным устройством. Прямое измерение осуществляется измерительным прибором величины, воспроизводимой многозначной эталонной меры. Измерение действительного размера меры посредством нахождения при помощи поверяемого средства прямыми измерениями нескольких эталонных величин, связанных с искомой величиной определенной зависимостью. Измерение путем автономной или независимой поверки.

Схемы для осуществления поверки СИ

Для осуществления поверки средств измерения существует система передачи размера единица измеряемой величины. Она необходима для достоверной передачи единиц измерения метрологической цепи от исходного образцового средства к устройствам измерения в определенном порядке согласно поверочной схеме. Поверочной схемой называется документ, который упорядочивает средства, методы поверки и точность передачи физической величины [3]. В международных документах устанавливается положение о требовании прослеживать результаты измерений или поверки каждого устройства измерения. Связь результата измерений с национальным или международным эталонами по непрерывной цепи сличения называется прослеживаемостью, она определяет непрерывность передачи данных измерений. В поверочной схеме отражают средства измерения (рабочие или образцовые), методы передачи измерений, наименования эталонов и направление передачи. В нее так же входят погрешности всех образцовых и рабочих средств и диапазоны измерения. Данные схемы составляют индивидуально для каждой поверяемой величины, они могут быть разного вида: межгосударственной, государственной, ведомственной или локальной.

Межгосударственная схема распространяется на все средства измерения величины, которые применяются на территории государств-участников соглашения о сертификации. Государственная в свою очередь распространяется на все СИ, связанные с физической величиной, и применяется на территории одной страны-государства. Схемы данного типа формируются одним ГОСТ и ГСИ. Межгосударственные и государственные схемы разрабатывают государственные научно-метрологические институты или государственные региональные центры метрологии. В случае межгосударственных над разработкой схем работают ведущие организации метрологии от каждой страны партнера соглашения. Как правило, разработанные схемы формируются в формате ГОСТ или правил межгосударственной стандартизации (ПМГ) [4]. Государственные в свою очередь составляются как ГОСТ и руководящий документ (РД). Отличие ведомственной схемы от других заключается в том, что первая разрабатывается отдельным ведомством, согласовывается с главным центром эталонов и распространяется исключительно на СИ подлежащие внутриведомственной поверке. Локальная схема является, по сути, частной, поскольку распространяется на КИПы, имеющие право быть поверенными на определенном предприятии по ее стандарту, при этом данная схема должна соответствовать требованиям государственной. Ведомственные схемы должны быть согласованы национальным метрологическим институтом, который является держателем национального эталона, а локальные – ре-

гиональным центром государственной метрологической службы (ГМС). Данные поверочные схемы могут быть оформлены как в виде отраслевого стандарта, так и в виде стандарта предприятия, при этом они должны быть составлены согласно межгосударственному стандарту ГОСТ 8.061-80 [5].

Проблема осуществления поверки СИ

Разнообразие видов и схем поверки само по себе исключает возникновение проблемы в процессе проверки оборудования, поскольку практически на каждый случай существует определенный метод и схема, которые избираются в зависимости от типа проведения аккредитации СИ [6]. Но если рассмотреть степень автоматизации, то можно заметить, что неавтоматизированный тип укладывается во все правила без возникновения каких-либо проблем в процессе проверки. Если обратиться к автоматическому методу, становится ясно, что он по большому счету является автоматизированным, то есть так или иначе участие человека в процессе поверке предусмотрено, будет оно физическим вмешательством, подключение СИ к оборудованию или программным, отслеживание и корректировка данных поверки для ее правильности. Конечно, существуют варианты автоматической проверки, но они решают исключительно один аспект проблемы, как правило программный. То есть это схема поверки одного типа, но решения являются частными, не предусматривающими другие схемы.

Выводы

Необходимость проведения поверки СИ обусловлена поддержанием корректного функционирования этого устройства и оборудования, в которое оно входит. Для достижения данной цели существуют всевозможные методы и типы проведения поверок, а также сформированы схемы, благодаря которым и проходит аттестация оборудования. Разделение схем на четыре основных типа связано с необходимостью корректной аттестации измерительного оборудования, которое может использоваться в различных сферах, территориях и даже при импорте или экспорте СИ. Однако спорным моментом в сфере метрологии является автоматическая поверка. Для реализации полностью автоматической поверки СИ предстоит решить проблему подключения устройств измерения к поверочному оборудованию. Если в выборе способа, целевого назначения и метода поверки не возникает сложности, то схему поверки необходимо составить с учетом всех особенностей автоматического способа аттестации.

Библиографический список

1. Порядок приема и регистрации средств измерений на поверку. URL: https://studopedia.su/8_30506_metodi-poverki-sredstv-izmereniy. html (дата обращения: 06.01.2022).

2. *Пантюшина В. С.* Электротехника // Высшая школа. 1976. С. 312–319.

3. Методы передачи размера единицы физической величины. URL: https://metrob.ru/html/poverka/peredacha-edinici. html (дата обращения: 07.01.2022).

4. Правила по межгосударственной стандартизации 96-2009. URL: https://docs. cntd.ru/document/1200079072 (дата обращения: 07.01.2022).

5. ГОСТ 8.061-2006. URL: https://docs. cntd.ru/document/1200004558 (дата обращения: 06.01. 2022).

6. *Касаткин А. С., Немцов М. В.* Электротехника // Высшая школа. 2002. С. 339–356.

УДК 621.314.1 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-156-160**

Д. Д. Буйчик*
магистрант
В. В. Булатов*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРИМЕНЕНИЕ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ МАЛОМОЩНЫХ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ

В статье рассмотрен процесс создания вторичного источника питания на базе ионисторов, осуществлена разработка структурной схемы проектируемой системы, изложены основные этапы проектирования, представлена принципиальная электрическая схема, а также результаты проведенных экспериментальных исследований.
Ключевые слова: *суперконденсаторы, источники питания, маломощные системы, микроконтроллеры, солнечные батареи.*

V. V. Bulatov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
D. D. Buichik*
Postgraduate student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE APPLICATION OF SUPERCAPACITORS AS POWER SUPPLIES FOR LOW-POWER AUTONOMOUS SYSTEMS

The article describes the process of creating a secondary power source based on supercapacitors, a structural diagram of the system being designed was developed, the main design stages are outlined, a schematic electrical diagram is presented, as well as the results of experimental studies.
Keywords: *supercapacitors, power supplies, low-power systems, microcontrollers, solar panels.*

С 2006 года мировой рынок суперконденсаторов (ионисторов) увеличился в 50 раз – от 20 млн долларов до 1 млрд [1]. Благодаря разработкам в области производственного процесса и технологий материалов суперконденсаторы нового поколения производятся в промышленных масштабах. Область применения суперконденсаторов постоянно расширяется. Ионисторы нашли свое применение в промышленности, бытовой электронике, оборудовании связи, а также медицинском и военном деле, на транспорте и в других областях.

Последнее десятилетие ознаменовалось бурным развитием маломощной электроники [2]. Питающими устройствами для этих систем часто выступают возобновляемые источники энергии (ВИЭ): солнечные батареи (СБ), ветряные турбины, преобразователи вибрации и т. д. Однако в связи с особенностями данных источников питания вырабатываемой ими энергии достаточно только для систем с низким энергопотреблением, реализация подобных решений требует внимательного и досконального подхода к проектированию [3].

Вторичные источники питания (ВИП) в системах с солнечными батареями, ветряками и преобразователями тепла применяются при необходимости стабилизации величины и длительности вырабатываемой электроэнергии. Наиболее популярными ВИП являются аккумуляторные батареи, но к их недостаткам можно отнести долгий заряд и ограниченное количество циклов разряда. Электрохимическими устройствами с практически неограниченным числом циклов заряда-разряда, быстрым циклом заряда, а также с высокой пиковой мощностью являются суперконденсаторы. Тем не менее в связи с их малой емкостью применение ионисторов оправдано лишь в низкопотребляющих устройствах.

Использование ионисторов совместно с ВИЭ является перспективным направлением развития источников питания. В связи с уменьшением стоимости солнечных батарей и фактически не ограниченной длительностью жизни модулей, все чаще разработчики автономных систем применяют их в качестве источников электроэнергии.

Рис. 1. Структурная схема проектируемой системы: СБ – солнечная батарея; защита – защита от повреждения СБ и саморазряда ионистора; имп. преобр. заряда/разряда – повышающий импульсный преобразователь постоянного напряжения в постоянное; ИОН – ионистор; МК – микроконтроллер

Из-за линейного характера разряда суперконденсатора, а также требуемой плавностью заряда с ограничением по току и напряжению ионистора в проектируемой системе необходимо применение повышающих преобразователей, к тому же импульсного характера – для уменьшения тепловых потерь и глубокого использования ресурса накопителя.

В качестве нагрузки проектируемой системы были рассмотрены микроконтроллер и датчик, обеспечивающий сбор данных об окружающей среде.

Принимая во внимание все вышеизложенное, была разработана следующая структурная схема решения (рис. 1).

В качестве звена нагрузки был выбран датчик температуры DS18B20, подключаемый по протоколу 1-Wire. Благодаря диапазону температур от –55 до 125 °С, а также герметичному корпусу датчик может быть использован в большинстве климатических зон.

На основании анализа [4] в качестве микроконтроллера для проектируемого ВИП была выбрана плата NodeMCU. Плата обладает встроенным Wi-Fi модулем ESP-12E. Скорость работы выбранного микроконтроллера более чем на 80 % выше по сравнению с микроконтроллерами семейства Arduino, такими как Leonardo и UNO.

Для сбора данных, передающихся с датчика, был использован сервис Blynk. Подключение датчика к микроконтроллеру в упрощенном виде изображено на рис. 2.

Связь между NodeMCU и датчиком поддерживается с помощью Wi-Fi модуля. Один из способов подключения DS18B20 к микроконтроллеру изображен на рис. 3.

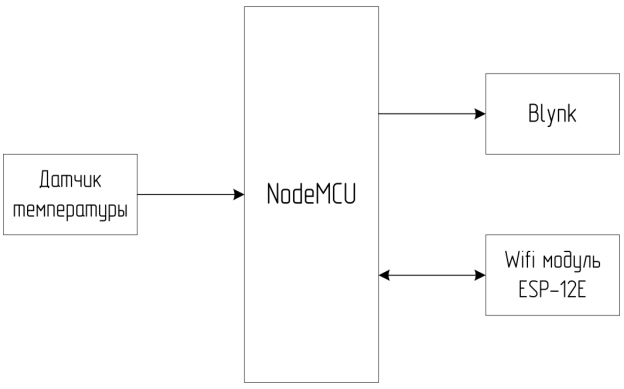


Рис. 2. Подключение датчика к МК

Во избежание усложнения системы и дополнительных экономических вложений в нее в разрабатываемой схеме используется подключение датчика «напрямую» (рис. 4), так как при использовании метода паразитного питания требуется дополнительный подтягивающий транзистор.

Выбор суперконденсатора, а именно его емкости требует определения токопотребления нагрузки (звено микроконтроллер-датчик). Из проведенных измерений выявлено, что пиковый ток в момент отправки полученных данных на сервер Blynk составляет 880 мкА, средний ток рабочего режима составляет 310 мкА, ток в режиме Deep-sleep микроконтроллера составляет 47 мкА. Зависимость потребляемого тока от времени в режиме передачи данных по Wi-Fi представлена на рис. 5.

По результатам расчетов [5] средний ток нагрузки и мощность, потребляемая нагрузкой на единицу времени, составили соответственно 47,32 мкА и 236,6 мкВт. При расчетах учитывалась энергия суперконденсатора, достаточная для того, чтобы автономно обеспечивать потребности нагрузки в течение одного дня при полном отсутствии освещенности солнечных батарей. Необходимый объем энергии составил 20,44 Дж, а требуемая емкость ионистора с учетом энергии автономного обеспечения нагрузки 1,5 Ф.

В качестве суперконденсатора была выбрана модель FE0H155ZF, обладающая следующими характеристиками: рекомендуемое напряжение заряда 5 В; максимальный рекомендуемый ток заряда 285,7 мА [5]. Теоретическое время разряда ионистора составило 26 часов, что соответствует поставленной задаче.

Согласно ранее составленной структурной схеме (рис. 1) в качестве первичного источника питания проектируемой системы выступают СБ. Был выбран поликристаллический солнечный модуль YD-107X61. Для предотвращения перегрева и повреждения панели применяется диод Шоттки PMEG1020EJ.

Неконтролируемое продолжительное увеличение тока заряда суперконденсатора выше рекомендуемого значения ведет к общей деградации устройства. В этих же целях необходимо поддерживать требуемое зарядное напряжения.

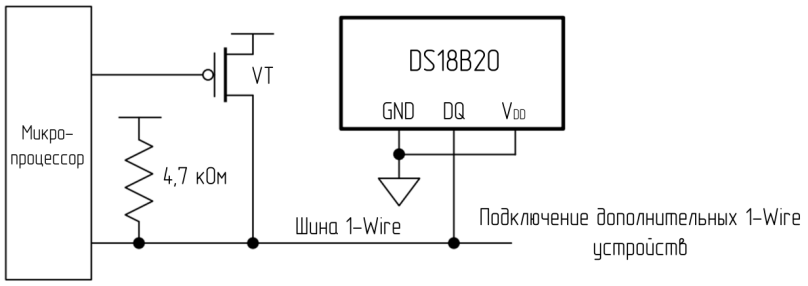


Рис. 3. Паразитное питание DS18B20

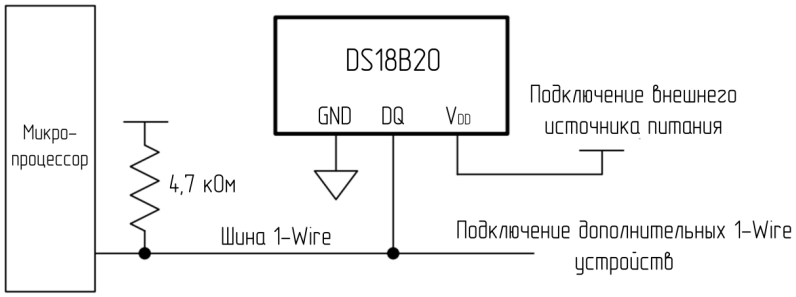


Рис. 4. Питание DS18B20 от внешнего источника питания

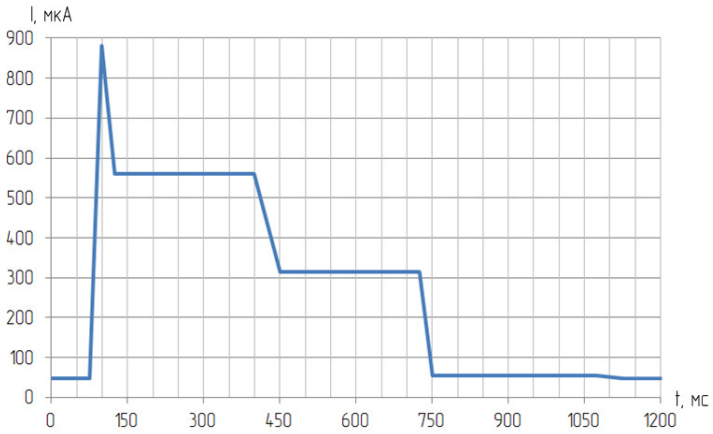


Рис. 5. Токопотребление нагрузки

На основании этого был выбран повышающий преобразователь постоянного напряжения EK-1674Module, обладающий, кроме всего прочего, минимально возможным (в выбранном классе) рабочим напряжением – 0,7 В, что гарантирует работоспособность проектируемой системы в условиях низкой освещенности СБ.

В связи со спецификой разряда ионистора (рис. 6) для поддержки на нагрузке системы требуемого номинала тока преобразователю, применяемому на выходе суперконденсатора, необходимо обладать минимально возможным входным напряжением.

Исходя из этих соображений был выбран преобразователь MAX1678. Требуемая обвязка преобразователя представлена на рис. 7.

Принципиальная схема разработанного устройства представлена на рис. 8.

Экспериментальная часть исследований представляет собой испытания собранной установки (рис. 9, *а*). Установка показала себя исправной, все возложенные на нее функции выполняет. Для того чтобы полностью зарядить ионистор от нулевого до номинального напряжения, потребовалось 10 мин (рис. 9, *б*). При заданном номинальном напряжении (5 В) ток разряда

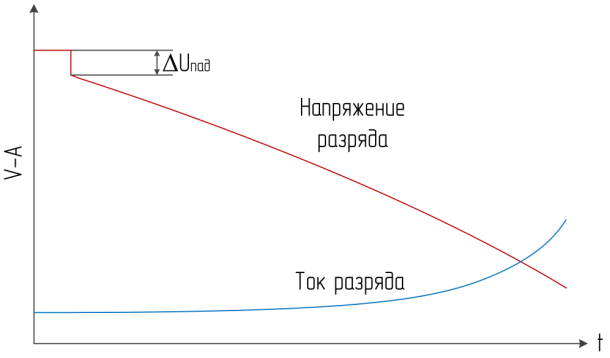


Рис. 6. ВАХ разряда суперконденсатора

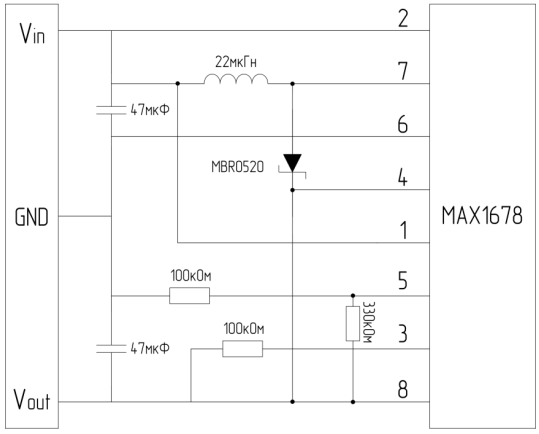


Рис. 7. Обвязка преобразователя MAX1678

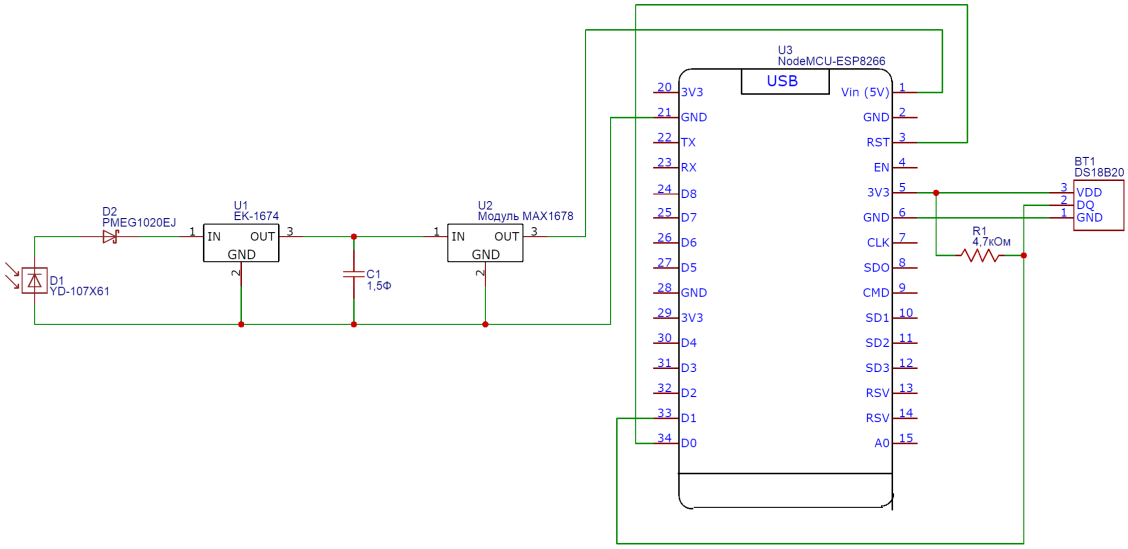


Рис. 8. Принципиальная электрическая схема

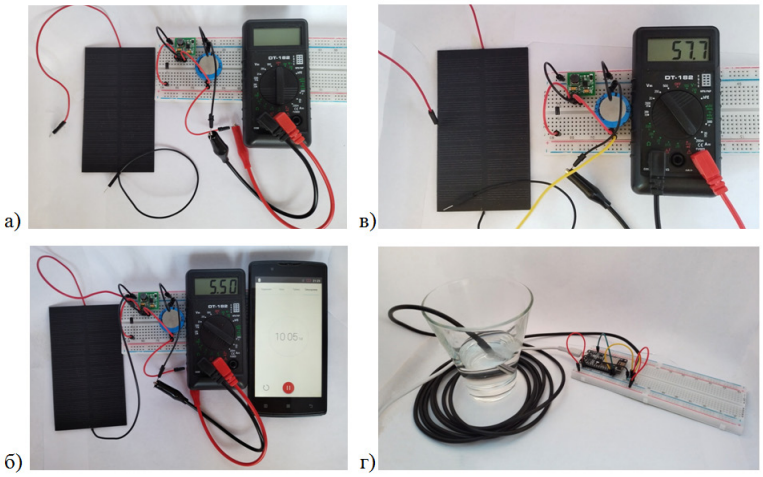


Рис. 9. Проведенные испытания экспериментальной установки: а – общий вид установки: ионистор, повышающий импульсный преобразователь, диод Шоттки, солнечная панель; б – снятие показаний ионистора; в – снятие тока разряда ионистора; г – испытание комплекса датчика и микроконтроллера

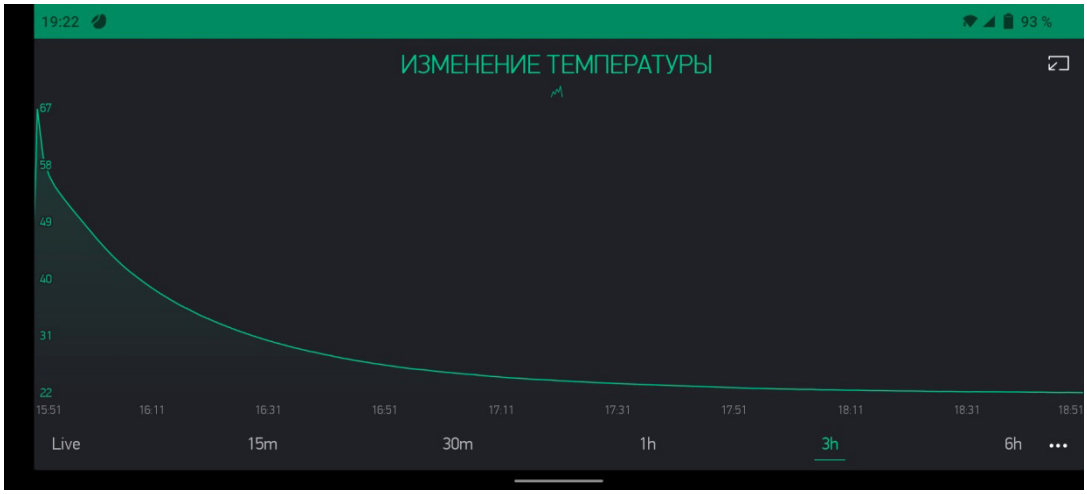


Рис. 10. График, полученный в приложении Blynk

составил около 58 мА (рис. 9, *в*). Помимо этого, отдельно были испытаны выбранный датчик и запрограммированный микроконтроллер, подключенный к сервису Blynk (рис. 9, *г*). В качестве исследования было совершено наблюдение за процессом снижения температуры нагретой воды (до 67 °С) до комнатных значений (22 °С). Данная часть системы показала стабильное функционирование. Изменение температуры в течение эксперимента представлено на рис. 10.

Дальнейшие испытания ограничиваются отсутствием платы обвязки импульсного преобразователя MAX1678.

Выводы

Разработан вторичный источник питания на базе ионисторов с использованием солнечной батареи. Проведены экспериментальные исследования полученной установки. Данная работа позволила выявить возможные направления развития зарядных устройств на базе суперконденсаторов.

Библиографический список

1. *Ju F., Zhang Q., Deng W.* IEEE International Conference on Automation Science and Engineering IEEE, 2020. P. 143–148.

2. *Белоус А., Солодуха В.* Основные тенденции развития, проблемы и угрозы современной микроэлектроники // Компоненты и технологии. 2019. № 10 (219). С. 18–23.

3. *Уитакер М., Бочарников И.* Новый этап в развитии автономных устройств // Компоненты и Технологии. 2010. № 109. С. 146–149.

4. *Suszek P., Szymczyk T.* Analiza porównawcza mikrokontrolerów z rodziny Arduino oraz innych kompatybilnych // Journal of Computer Sciences Institute. 2020. N 17. P. 365–372.

5. *Буйчик Д. Д.* Проектирование вторичного источника питания на базе ионисторов. СПб.: ГУАП, 2021. С. 34.

УДК 621.865

В. А. Голубков*
кандидат технических наук, доцент
А. Г. Федоренко*
кандидат технических наук, доцент
Е. Ю. Ватаева*
старший преподаватель
Т. Т. Шарафудинов*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ФОРМИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ НА ДОРОЖКАХ КАЧЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО И НАРУЖНОГО КОЛЕЦ ПОДШИПНИКА

В данной статье рассматривается условия возникновения локальных дефектов на беговых дорожках наружных и внутренних колец шарикоподшипников электромеханических систем, приводящих к внезапным отказам. Также анализируется влияние выбора числа тел качения подшипников с точки зрения увеличения ресурса работы системы.
Ключевые слова: *шарикоподшипники, электромеханические системы, локальные дефекты.*

V. A. Golubkov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. G. Fedorenko*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
E. Y. Vataeva*
Senior Lecturer
T. T. Sharafudinov*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

FORMATION OF LOCAL DEFECTS ON THE RECEWAYS OF THE INNER AND OUTHER RINGS OF THE BEARING

This article discusses the conditions for the occurrence of local defects on the treadmills of the outer and inner rings of ball bearings in electromechanical systems, leading to sudden failures. The influence of the choice of the number of rolling elements of bearings is also analyzed in terms of increasing the service life of the system.
Keywords: *ball bearings, electromechanical systems, local defects.*

В процессе длительной эксплуатации многороторных электромеханических систем основной причиной отказа их наименее надежных элементов – шарикоподшипников, является внезапный отказ, вызванный локальными дефектами беговых дорожек неподвижного (чаще всего наружного) и подвижного (внутреннего) колец подшипника. Особое значение в этом случае приобретает фазовое расположение локальных дефектов, которое характеризуется кратностью угла между шариками $\Delta\varphi_{Ш}$ и может привести к эффекту заклинивания. В качестве основных воздействий, формирующих локальные дефекты, следует рассматривать воздействие от неуравновешенности вращающихся масс $F_{Д}$ и суммарного воздействия F_{Σ}, вызванного движением общего элемента системы – основания. Рассмотрим вначале воздействие $F_{Д}$. Поскольку $F_{Д}$ имеет постоянное положение на вращающемся роторе, то зона износа на вращающемся кольце равна $2\Delta\varphi_{Ш}$ с максимальной нагрузкой в месте расположения вектора $F_{Д.}$ На неподвижном кольце $F_{Д}$ последовательно проходят все шарики. Характер движения шариков определяется скоростью сепаратора, которая равна

$$\dot{\varphi}_{c} = kn_{г}\dot{\varphi},$$

где k – параметр подшипника; $n_{г}$ – номер гармоники вращения, $\dot{\varphi} = 1$.

Для каждого числа шариков z имеется критическое значение k, которое характеризует приход исходного или любого шарика в исходное положение, характеризующееся тем, что $F_{Д}$ расположен на шарике. Таким образом, возни-

кает условие формирование лунок. При иррациональном значении k в фазовом угле $\Delta\varphi_{Ш}$ имеет место остановки $F_Д$ на шарике с определенным шагом. Если шаг имеет малое значение, то можно утверждать, что $F_Д$ вызывает равномерный износ неподвижного кольца [1].

Совершенно другую картину представляет характер воздействия F_Σ со стороны движущего основания. Зависимость можно записать в следующем виде:

$$F_\Sigma = \sqrt{F_x^2 + F_y^2};\ \varphi_F = \operatorname{arctg}\frac{F_x}{F_y};$$

$$\dot{\varphi}_F = \frac{d\varphi_F}{d\varphi};\ \dot{h} = JF_\Sigma \cdot \frac{d\varphi}{d\varphi_F},$$

где F_x, F_y – воздействия, определяемые по информационным сигналам вибрационных процессов; $\dot{h}$ – скорость износа в точке при известной интенсивности износа J; $\varphi=2\pi ft$; f – наименьшая частота вращения элементов системы.

Основным параметром, подлежащим исследованию, является скорость износа $\dot{h}$, поскольку скорости в точке могут складываться и давать суммарно скорость износа в точке беговой дорожки. Для более наглядной картины износа беговых дорожек внутреннего и наружных колец подвеса целесообразно использовать циклограммы нагружения шариков.

Положение шариков относительно колец подшипника может быть найдено с помощью следующих выражений:

неподвижное кольцо $\varphi_{Ш i} = kn_\Gamma\varphi + (i-1)\Delta\varphi_Ш$,
подвижное кольцо $\varphi_{Ш i} = (k-1)n_\Gamma\varphi + (i-1)\Delta\varphi_Ш$.

Особое значение для совместной нагрузки имеет место соотношение скоростей вращения векторов $F_Д$ и F_Σ. Положение векторов $F_Д$ и F_Σ может отличаться угловыми секторами с углами равными $\Delta\varphi_Ш$. Взаимное положение может быть в одном секторе, соседних секторах, разных секторах.

Поскольку $F_Д$ чаще всего вызывает достаточно равномерный износ, то особое внимание следует уделять положению вектора F_Σ в фазовом пространстве беговых дорожек колец подшипника [2].

При анализе воздействия F_Σ особое внимание следует обращать на характер изменения скорости $\dot{\varphi}_B$, закономерности изменения скаляра вектора F_Σ, значение скоростей износа $\dot{h}$ [3].

Фазовое положение вектора F_Σ отражает характер нагружения участков беговых дорожек колец подшипника. Угол φ_F характеризует положение вектора F_Σ на неподвижном кольце. Разность углов φ_F и $\varphi_Д$ характеризует положение вектора F_Σ относительно подвижного кольца.

Поскольку скорость вращения векторов $F_Д$ в системе различны, то один и тот же характер износа F_Σ различным образом влияет на износ подвижных колец и менее существенно на износ неподвижных колец подшипника.

Большое значение имеет число шариков z в подшипнике. Четное число шариков подшипников менее предпочтительно, поскольку повторение ситуации имеет место при половине оборота сепаратора. Нечетное количество шариков дает возможность повторять ситуацию после целого оборота сепаратора.

При рассмотрении условий формирования локальных дефектов особое внимание следует обращать на характер развития дефектов вширь или вглубь. Рост дефектов вглубь приводит к формированию лунок и созданию условий заклинивания. Если же преобладает рост дефектов вширь, то формируются гармоники неровностей беговых дорожек колец и соответственно повышается ресурс функционирования элементов за счет исключения условий формирования внезапных отказов [4].

Моделирование характера суммарного воздействия F_Σ, нахождение фазовых положений его концентрации, нахождение углов между пиковыми значениями износа беговых дорожек колец подшипников позволяет грамотно выбрать параметр z и существенно повлиять на увеличение ресурса работы элементов в условиях эксплуатации. За счет выбора различных параметров подшипников можно обеспечить один и тот же ресурс отдельных элементов системы.

Библиографический список

1. *Голубков В. А., Голубков А. В., Соколов Ю. Н.* Вопросы проектирования электромеханических устройств с длительным ресурсом работы // Восьмая научная сессия ГУАП: сб. докл. В 2 ч. Ч. 1: Технические науки. СПб.: ГУАП, 2005. С. 283–285.

2. *Голубков В. А., Голубков А. В., Соколов Ю. Н.* Критерии оценки технического состояния электромеханических систем // Восьмая научная сессия ГУАП: сб. докл. В 2 ч. Ч. 1: Технические науки. СПб.: ГУАП, 2005. С. 286–288.

3. *Голубков В. А., Голубков А. В., Соколов Ю. Н.* Анализ возникновения локальных дефектов в опорах качения сложных электромеханических систем // Завалишинские чтения. СПб.: ГУАП, 2011. С. 114–116.

4. *Близневский А. С., Головенкин Е. Н.* Выявление условий формирования внезапных отказов элементов систем // Перспективные материалы, технологии, конструкции-экономика: сб. научн. трудов. Вып. 6. Материалы Всероссийской НТК (25–27 мая 2000 г.). Красноярск, 2000. С. 583–586.

УДК 539.31 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-163-166**

Д. Ю. Ершов*
кандидат технических наук, доцент
И. Н. Лукьяненко*
кандидат технических наук, доцент
Е. Э. Аман*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ МАТРИЧНЫМ МЕТОДОМ

В статье представлено теоретическое исследование нахождения передаточной функции упругой механической системы с распределенными параметрами. Приводится общий вид матрицы передаточных функций в виде, аналогичном решению Гильберта – Шмидта. Представлен матричный метод определения передаточной функции системы.
Ключевые слова: *передаточная функция, динамические характеристики, операторный метод, формула Гильберта – Шмидта, ряд Фурье.*

D. Y. Ershov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
I. N. Lukyanenko*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
E. E. Aman*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DETERMINATION OF TRANSFER FUNCTIONS OF MECHANICAL SYSTEMS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS BY THE MATRIX METHOD

The paper presents a theoretical research of finding the transfer function of elastic mechanical system with distributed parameters. A general view of the transfer function matrix in the form similar to the Hilbert – Schmidt solution is given. A matrix method for determining the transfer function of the system is presented.
Keywords: *transfer function, dynamic characteristics, operator method, Hilbert – Schmidt formula, Fourier series.*

При исследовании динамического качества и устойчивости замкнутых систем, включающих упругие звенья с распределенными параметрами, прежде всего, возникает задача определения матрицы передаточных функций этих звеньев. Общие результаты функционального анализа подсказывают довольно простое решение этой задачи, основанное на спектральном разложении в ряд, но собственным функциям некоторого самосопряженного оператора в виде, аналогичном решению Гильберта – Шмидта. Роль этого оператора играет оператор, описывающий статические деформации упругого звена. Решение Гильберта – Шмидта будет соответствовать решению задачи, о вынужденных колебаниях без трения в виде ряда по формам свободных колебаний.

Учет демпфирования по каждой форме колебаний осуществляется интегрально, хотя в целом учитывается его специфика в каждом элементе конструкции.

Будем считать, что для упругой системы справедливы уравнения

$$\left(C + C_1 \frac{d}{dt}\right) D^* u = 0$$

$$D\sigma + R\frac{d^2u}{dt^2} + T\frac{du}{dt} - f = 0. \qquad (1)$$

Здесь σ – обобщенные силы; u – обобщенные перемещения; D и D^*– дифференциальные операторы, сопряженные в смысле Лагранжа

$$\int_V (D\sigma)^T u dV = \int_V \sigma^T D^* u dV - \int_S (n\sigma)^T u dS. \qquad (2)$$

Индекс T– транспонирование; S – граница области; R – симметричная положительно определенная матрица распределения масс или удельная масса; C – симметричная положительно определенная матрица или тензор упругих характеристик; T и C_1 – симметричные положи-

тельно определенные матрицы или тензоры, характеризующие рассеивание энергии; n – матрица статической совместности на поверхности тела S или орт нормали.

Уравнения (1) дополним граничными и начальными условиями, в частности, тем, где заданы нагрузки и выполнены условия

$$n\sigma\Big|_{s1} = \sigma_s(\alpha,t),$$

а там, где заданы перемещения

$$u\Big|_{s2} = u_s(\alpha,t)$$

Начальные условия обычно относят к перемещениям и задают в виде:

$$u\Big|_{t-0} = u_0(\alpha);$$

$$\dot{u}\Big|_{t-0} = \dot{u}_0(\alpha),$$

где α – пространственная координата.

В нашем случае рассмотрим такие граничные условия, когда часть границы жестко закреплена, то есть $u\Big|_{s1} = 0$. Таким образом, когда рассматриваются свободные колебания, в равенстве (2) пропадает интеграл по поверхности.

Уравнения вида (1) справедливы для пространственного упругого тела, плит, стержней, оболочек [1]–[3].

Так, например, в случае пространственного тела $\sigma = \sigma_{ij}$ – тензор напряжений; $u=u_i$ – вектор перемещений; $f=f_i$– вектор объемных сил

$$D\sigma = -\frac{d\sigma_{ij}}{d\alpha_i}$$

$$D^*u = \frac{1}{2}\left(\frac{du_j}{d\alpha_i} + \frac{du_i}{d\alpha_j}\right).$$

Если тело изотропно, то

$$C = C_{ijkl} = \lambda\delta_{ij}\delta_{kl} + G\left(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}\right),$$

где G – удельная масса.

Второе уравнение системы (1) соответствует телу Кельвина – Фойгта. Для пространственного изотропного тела

$$C_1 = C_{1ijkl} = \lambda_1\delta_{ij}\delta_{kl} + G\left(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}\right),$$

если $\sigma_{ij} = K\varepsilon_{kk}$, где K – объемный модуль упругости, то второе уравнение (1) запишется

$$2\left(1+\tau_k\frac{d}{dt}\right)G\varepsilon_{ij} + \frac{1}{3}\delta_{ij}\left[3K - 2\left(1+\tau_k\frac{d}{dt}\right)G\right]\varepsilon_{kk} = \tau_{ij},$$

где τ_k – коэффициент вязкого сопротивления.

В динамике упругих систем часто полагают

$$C_1 = \tau_k C$$

при этом τ_k выбирают так, что $C_1\frac{d}{dt}D^*u$ не зависит от частоты при гармонических колебаниях.

Исключим из уравнения (1) обобщенные силы, получим следующее выражение

$$R\frac{d^2u}{dt^2} + B\frac{du}{dt} + Ku = f, \qquad (3)$$

где $B = T + DC_1D^*$, $K = DCD^*$.

Если ввести множество непрерывных дважды дифференцируемых вектор-функций $L(V)$, удовлетворяющих однородным граничным условиям

$$CD^*u\Big|_{s1} = 0;\ u\Big|_{s2} = 0 \qquad (4)$$

то для всех $u,v \in L(V)$ справедливо соотношение

$$\int_V (K_u)^T v dV = \int_V u^T K v dV,$$

где оператор K симметричен $L(V)^V$.

Определим в $L(V)$ скалярное произведение и норму

$$\int_V (Ru)^T v dV = (u,v) \qquad (5)$$

$$\int_V (Ru)^T u dV = \|u\|^2. \qquad (6)$$

Рассмотрим оператор $K_V = R^{-1}K$. Очевидно,

$$(K_V u, v) = (u, K_V v). \qquad (7)$$

Кроме того, из (7) следует

$$(K_V u, u) - \int_V \left(CD^*u\right)^T D^*u dV \geq 0$$

Так как подынтегральное выражение – положительно определенная квадратичная форма (удвоенная удельная потенциальная энергия), можно показать, что для K_V справедлива оценка $(K_V u, v) =\geq C\|u\|^2$, где $C>0$, то есть K_V является положительно определенным на $L(V)$ и, следовательно, он имеет обратный оператор. Обратный оператор будет уже интегральным.

Согласно общей теории собственные функции оператора K_V, то есть нетривиальные решения уравнения

$$K_V u - \lambda^* u = 0 \qquad (8)$$

ортогональны

$$(u_n, u_m) = \begin{cases} 0, n \neq m \\ \|u_m\|^2, n = m \end{cases} \qquad (9)$$

собственные числа $\lambda^* = \omega^2$ – не отрицательны. При этом уравнение (8) – уравнение для форм колебаний, а формула (9) – условие их ортогональности, ω – частота колебаний.

Рассмотрим интегральное уравнение динамики

$$\int_V \delta(\alpha,\beta)\left[f(\alpha,t) - R(\alpha)\frac{d^2u}{dt^2} - B(\alpha)\frac{du}{dt} \right] dV = u(\beta). \quad (10)$$

Здесь $\delta(\alpha,\beta)$ – матрица Грина, обладает свойством $\delta(\alpha,\beta) = \delta(\beta,\alpha)^T$.

Уравнение для амплитуд вынужденных колебаний без учета трения

$$\int_V \delta(\alpha,\beta)\left[f(\alpha) - \omega^2 R(\alpha) u(\alpha) \right] dV = u(\beta). \quad (11)$$

Здесь u и f – амплитуды колебаний и возмущающих сил. Обозначим

$$Au = \int_V \delta(\alpha,\beta) R(\alpha) u(\alpha) dV = u(\beta); \ \frac{1}{\omega^2} = \lambda.$$

Тогда уравнение (11) запишем в виде:

$$Au - \lambda u = F,$$

где $F = -\lambda \int_V \delta(\alpha,\beta) f(\alpha) dV$.

Введем скалярное произведение и норму по формулам (5) и (6). По определению A является обратным K_V на $L(V)$, то есть

$$K_V \int_V \delta(\alpha,\beta) R(\alpha) u(\alpha) dV = u(\beta)$$

для всех $u(\alpha) \in L(V)$ $\lambda^* = 0$ не является собственным числом оператора K_V. Оба уравнения (12) и (3) при B=0 оказываются однородными одновременно, если f=0. Поэтому собственные функции обоих уравнений совпадают. Но оператор A допускает расширение на гильбертово пространство квадратично суммируемых в V с весом R вектор-функций $L_{2,R}(V)$, при этом

$$(Au, v) = (u, Av) \qquad (13)$$

для всех $u, v \in L_{2,R}(V)$. В силу соотношения (13) и полноты $L_{2,R}(V)$ оператор A является самосопряженным, а значит, область значений K_V всюду плотна в $L_{2,R}(V)$. Далее, поскольку A является еще и вполне непрерывным, то он имеет дискретный спектр, состоящий из счетного множества собственных значений. Решение уравнения (12), если λ не принадлежит спектру, при любых $F \in L_{2,R}(V)$ имеет вид:

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda} \frac{\lambda_n \eta_n}{(\lambda_n - \lambda)\|u_n\|^2} u_n - \frac{1}{\lambda} F, \qquad (14)$$

где $\eta_n = -\lambda \int_V \left\{ R(\beta) \left[\int_V \delta(\alpha,\beta) R(\alpha) dV \right] \right\}^T u_n(\beta) dV =$

$$= -\lambda\lambda_n \int_V u_n^T(\alpha) f(\alpha) dV.$$

Формула (14) дает решение задачи о вынужденных колебаниях без учета рассеивания энергии и носит название формулы Гильберта – Шмидта [4]. Если разложить слагаемое $\frac{1}{\lambda}F$ в формуле (14) в ряд Фурье по собственным функциям u_n, то решение запишется так:

$$u(\beta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n \int_V f^T(\alpha) u_n(\alpha) dV}{\left(1 - \frac{\lambda_n}{\lambda}\right)\|u_n\|^2} u_n(\beta). \qquad (15)$$

Нетрудно показать, что ядро $\delta(\alpha,\beta)$ представимо в виде билинейного ряда

$$\delta(\alpha,\beta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n u_n(\beta) u_n^T(\alpha)}{\|u_n\|^2}.$$

Рассмотрим решение задачи с трением. Для этого сначала преобразуем интегральное уравнение динамики (16) по Лапласу при нулевых начальных условиях. Затем будем искать решение в виде ряда по формам свободных колебаний (16)

$$u(\beta, p) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n(p) u_n(\beta). \qquad (16)$$

Подставим ряд (16) в уравнение (10), умножим на $u_n(\beta)$ и проинтегрируем по V. Если воспользоваться билинейным представлением ядра и условием ортогональности форм свободных колебаний (9), то для коэффициентов $a_n(p)$ получим бесконечную систему уравнений вида:

$$p^2 a_n(p)\|u_n\|^2 + p\sum_{r=1}^{\infty} a_r(p)\int_V (Bu_r)^T u_n dV + \\ +\omega_n^2 a_n(p)\|u_n\|^2 = \int_V f^T u_n dV, \qquad (17)$$

где p – параметр преобразования Лапласа.

Обозначим

$$B_n = \frac{\int_V (Bu_n)^T u_n dV}{\|u_n\|^2 \omega_n^2}.$$

Будем искать решение системы (17) с помощью итерационного процесса, взяв в качестве первого приближения $a_n(p)=0$. Тогда во втором приближении получим

$$a_n(p) = \frac{\lambda_n \int_V f^T u_n dV}{\left(\lambda_n p^2 + B_n p + 1\right)\|u_n\|^2}.$$

Предположим, что выполнены условия, когда применим принцип сжатых отображений, следовательно, обеспечена сходимость процесса, если трение мало, то можно ограничиться вторым приближением. Введем обозначения $\lambda_n = T_{n2}^2$; $B_n = T_{n1}$. Тогда для $u_n(\alpha)$ *получим*

$$u_n(\alpha) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n \int_V f^T u_n dV}{\left(T_{n2}^2 p^2 + T_{n1} p + 1\right)\|u_n\|^2} u_n(\alpha). \qquad (18)$$

В случае сосредоточенной силы формула (18) может быть представлена в виде:

$$W(p) f(\beta) = u(\alpha),$$

где

$$W(p) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n u_n(\alpha) u_n^T(\beta)}{\left(T_{n2}^2 p^2 + T_{n1} p + 1\right)\|u_n\|^2} \qquad (19)$$

Выражение (19) является передаточной матрицей упругой механической системы.

При $p = i\omega$ формула (18) дает решение задачи о вынужденных гармонических колебаниях упругого тела с трением. Если $\beta=0$, то из (18) получим формулу Гильберта – Шмидта в виде (15). Предложенная методика определения передаточной функции механической системы может быть использована для получения передаточных функций несущих систем металлорежущих станков [5].

Задача может быть решена в следующей последовательности. В начале строятся амплитудно-фазо-частотные характеристики (АФЧХ) системы. При этом может быть полезен метод малого параметра, пропорционального силам трения. Затем по построенным АФЧХ последовательными приближениями находится матрица передаточных функций системы. Далее находятся необходимые динамические параметры исследуемой системы.

Библиографический список

1. *Миронов А. С., Елисеев А. В.* Новые подходы в динамике колебательных систем: системообразующие структурные образования // Фундаментальные основы механики. 2018. № 3. С. 53–65.

2. *Хоменко А. П., Елисеев С. В.* Характеристическое частотное уравнение: структура, динамическая жесткость, особенности взаимодействия элементов системы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 2 (50). С. 12–24.

3. *Белокобыльский. С. В., Елисеев С. В., Ситов И. С.* Динамика механических систем. Рычажные и инерционно-упругие связи: монография. СПб.: Политехника, 2015. 319 с.

4. *Петровский И. Г.* Лекции по теории интегральных уравнений: учеб. пособие. М.: Политехника, 2009. 131 с.

5. *Игнатьев А. А., Каракозова В. А., Зорин А. И.* Моделирование и идентификация динамической системы шлифовального станка, определяющей качество поверхности качения колец подшипников на финишных операциях // Известия высших учебных заведений. Пенза: ПГУ, 2014. С. 62–76.

УДК 67.05

К. С. Исаков*
магистрант
В. В. Булатов*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СТАНОК ДЛЯ НАМОТКИ ПРОВОЛОКИ

В статье рассмотрен универсальный станок для намотки проволоки, произведен анализ существующих решений, разработана трехмерная модель станка для намотки проволоки, осуществлен расчет электродвигателя, произведен подбор элементов станка, подготовлен к вводу в эксплуатацию опытный образец.
Ключевые слова: *проволока, катушка, 3D-модель, станок для намотки, электропривод.*

K. S. Isakov*
Postgraduate Student
V. V. Bulatov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

UNIVERSAL WIRE WINDING MACHINE

The article considers a universal machine for winding wire, analyzes existing solutions, develops a three-dimensional model of a machine for winding wire, calculates an electric motor, selects machine elements, and prepares a prototype for commissioning.
Keywords: *wire, coil, 3D model, winding machine, electric drive.*

На сегодняшний день существует проблема реализации процесса намотки катушек металлической проволоки определенного метража, объема и плотности, а также присутствует низкая адаптивность уже разработанных станков под проволоку, отличающуюся типоразмером, материалом.

На рынке строительных материалов присутствует пять основных видов проволоки: алюминиевая, медная, оцинкованная, проволока из нержавеющей и низкоуглеродистой стали. Катушки различают по толщине (от 0,16 до 10 мм) [1]; длине (от 5 до 200 м); качеству и плотности намотки.

По результатам проведенного анализа в настоящее время существуют готовые решения для намотки проволоки.

В [2] представлен станок, который дает возможность наматывать тонкую проволоку $d < 0{,}5$ мм на бобины равномерно. Это обеспечивается шаговым двигателем (ШД). Для создания крутящего момента применяется асинхронный электродвигатель (ЭД) с редуктором.

Еще одной реализацией процесса намотки является установка [3], которая предназначена для работы с толстой проволокой d=[3; 10] мм. Здесь для выпрямления проволоки применяются прокатные ролики. Привод станка реализован на базе трехфазного асинхронного ЭД с ременной передачей. Станок обладает дисплеем, где отображается технологическая информация о процессе намотки.

Представленный в [4] станок используется для работы с тонкой медной проволокой, имеет большие габариты. В качестве исполняющего механизма используется трехфазный ЭД с редуктором и ременной передачей. В состав станка входит блок равномерной намотки, проволока наматывается на бобины.

В [5] продемонстрирован станок, работающий с толстой проволокой d=[3; 10] мм. Для преобразования крутящего момента применяется ременная передача. Особый интерес у данного станка представляет реализация блока подачи проволоки в рабочую область, движение направляющего ролика в котором осуществляется при помощи электродвигателя 12 В и шатуна. Также данная разработка имеет узел прокатки проволоки, защитные кожухи, экран отображения информации. Для станка разработана специальная насадка, которая позволяет отказаться от намотки проволоки на бобины.

Станок [6] дает возможность работать с проволокой d=[0,9; 3] мм, которая наматывается на

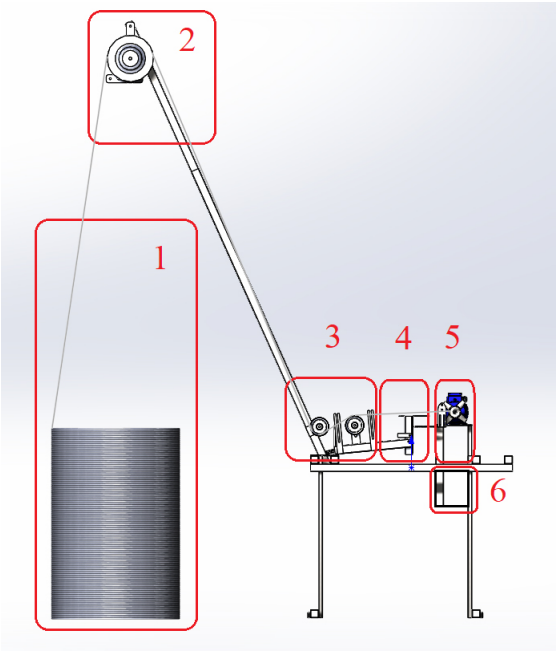


Рис. 1. Станок для намотки проволоки с основными рабочими блоками

насадку. Крутящий момент преобразуется ременной передачей. Станок обладает высокой скоростью намотки. При этом на экране отображается информация о процессе намотки проволоки. Защитные кожухи предостерегают от несчастных случаев.

На данный момент существует задача по созданию универсального станка для намотки проволоки. Целью данной работы является разработка установки, которая должна легко подстраиваться под разные виды проволоки, иметь оптимальные габариты и мощность, экран отображения информации, защитные экраны и насадку для намотки проволоки подобно станкам [4], [5]. Также станок должен быть надежным, ремонтопригодным и безопасным.

Таблица 1

Практические результаты соотношения минимально возможной скорости намотки и длины проволоки

Параметры проволоки		Скорость для перемотки проволоки d=0,9 мм, полученная при помощи ЧП, об./мин.		
Длина, м		50	100	200
Материал	оцинкованная	>300	>340	>390
	нержавеющая	>300	>360	>420
	из низкоуглеродистой стали	>350	>390	>470

На начальном этапе была построена 3D-модель станка в программном комплексе SolidWorks (рис. 1).

В блок разматывания проволоки (1) устанавливается бобина диаметром до 1,5 м и высотой до 2,5 м. Проволока пропускается через блок выпрямления (2). В блоке контроля (3) осуществляется оценка длины наматываемой проволоки при помощи датчиков Холла, управляющей программы и контроллера, находящегося в блоке управления (6).

Металлические направляющие малого внутреннего диаметра (приближенного к диаметру проволоки) не пропускают через себя возникшие узлы или бракованные участки проволоки, что приводит к ее натяжению. Натяжение проволоки воздействует на концевой переключатель, замыкая его контакты. Программа ставит работу станка на паузу с сохранением данных о длине намотанной проволоки, что позволяет возобновить работу станка после устранения неполадок и сократить количество брака на производстве.

Блок равномерного наматывания проволоки (4) включает в себя шаговый двигатель, драйвер для ШД и линейную направляющую с роликом, которая преобразует вращательное движение ШД в поступательное. Данный блок позволяет добиться равномерности наматываемой катушки и плотности слоев проволоки.

Блок наматывания проволоки (6) состоит из трехфазного электродвигателя 5АИ63В4У2 мощностью 0,37 кВт и насадки, благодаря которой можно регулировать форму катушки. Всеми внутренними процессами управляет контроллер и сопутствующая электроника: частотный преобразователь (далее ЧП) ESQ-A500-043-0,75K для электродвигателя, понижающие преобразователи напряжения 220V-12V-5V и пр.

ЧП позволяет станку, в отличие от редуктора и ременной передачи, в кратчайшие сроки менять скорость вращения ЭД и работать с проволокой разного диаметра и из разного материала, наматывая катушки со скоростью n=[300; 1340] об./мин. Согласно табл. 1 при скорости ниже 300 об./мин. станок неэффективен. Это связано с тем, что ЧП вместе с понижением скорости вращения вала ЭД понижает и мощность двигателя. В табл. 1 приведена информация о рекомендуемой скорости для катушек из оцинкованной, нержавеющей и низкоуглеродистой стали разного диаметра d=0,9 мм.

Разработанный станок рассчитан на работу с проволокой d=[0,5; 2] мм, изготовленную из оцинкованной, нержавеющей или низкоуглеродистой стали.

Конструкция станка позволяет адаптироваться к разным видам проволоки и материалу. Например, вместо стальной проволоки на низких оборотах и при смене насадки станок способен работать с медной проволокой, бечевкой, леской и т. п.

Также была разработана разборная рама станка, что упрощает транспортировку и позволяет изменять конфигурацию станка под нужды производства. Как и у аналогов, для управления станком нужен оператор.

Выводы

Под поставленные задачи был разработан станок для намотки проволоки из различных материалов, который по сравнению с аналогами имеет меньшие массогабаритные характеристики и высокую производительность, работает с разными видами проволоки, снижает производство бракованной продукции и позволяет регулировать скорость намотки.

Данный станок позволяет автоматизировать производство катушек проволоки, а также может в кратчайшие сроки и с минимальными затратами ресурсов изменить свои характеристики для работы с проволокой другого сечения или из другого материала.

Библиографический список

1. 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: 29.12.2021).

2. URL: https://www.youtube.com/watch?v=RB0wjgQgmd4&ab_channel=%D0%A7%D0%9F%D0%A3 (дата обращения: 05.01.2022).

3. URL: https://www.youtube.com/watch?v=i9EWI15yS-Q&ab_channel=%D0 %A1%D0%B8%D0%B1%D0%B8%D1%80%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9%D0 %A2%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9%D0 %A6%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%80 (дата обращения: 05.01.2022).

4. URL: https://www.youtube.com/watch?v=vVgNTyNTmnk&ab_channel=%D0 %90%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%81%D0%B5%D0%B9%D0%92%D0%BB%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%B2 (дата обращения: 05.01.2022).

5. URL: https://www.youtube.com/watch?v=Gep1HyVvXls&ab_channel=geksokol1 (дата обращения: 05.01.2022).

6. URL: https://www.youtube.com/watch?v=T5rZyr7QtN4&ab_channel=BOSSALIEV (дата обращения: 05.01.2022).

УДК 67.05

К. С. Исаков*
магистр
Н. И. Гарматий*
магистр
Л. В. Соболева*
ассистент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СИСТЕМА ПРОИЗВОДСТВА МАТЕРИАЛА ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ИЗ ПЕРЕРАБОТАННОГО ПЛАСТИКА

В статье рассматривается линия переработки пластиковых отходов в материал для 3D-печати. Данная система рассчитана для бытового использования в загородных домах или в рамках малых производств, она включает в себя шредер, емкость для промыва и отделения разных видов пластика друг от друга, зону сушки, экструдер и систему охлаждения. Произведен анализ существующих решений, разработана трехмерная модель основных блоков системы и произведен подбор элементов установок.
Ключевые слова: *3D-печать, 3D-модель, пластик, переработка пластика, материал для 3D-печати.*

K. S. Isakov*
Master Student
N. I. Garmatiy*
Master Student
L. V. Soboleva*
Assistant
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

RECYCLED PLASTIC 3D PRINTING MATERIAL PRODUCTION SYSTEM

The article discusses the line for processing plastic waste into material for 3D-printing. This system is designed for domestic use in country houses or within small industries, it includes a shredder, a container for washing and separating different types of plastic from each other, a drying zone, an extruder and a cooling system. An analysis of existing solutions was made, a three-dimensional model of the main blocks of the system was developed, and elements of the installations were selected.
Keywords: *3D-printing, 3D-model, plastic, plastic recycling, 3D-printing material.*

В современном мире одной из глобальных проблем человечества является проблема, связанная с переработкой пластиковых отходов. В морях нашей планеты более 5,25 трлн отходов полимеров и других синтетических материалов. В 1950 году в мире производилось всего 1,7 млн тонн, в 1990 году – 105 млн тонн, а в 2017 году – 348 млн тонн. Загрязнение почвы и морской среды полиэтиленом, полистиролом и др. создает угрозу не только для современного человека, но и для будущих поколений.

В последнее время изучается новый перспективный подход к переработке полимеров, связанный с возможностями аддитивного производства наряду с разработкой аппаратных средств с открытым исходным кодом, таких как бытовые пластиковые экструдеры. Такой подход мог бы обратить вспять историческую тенденцию централизованной утилизации в сторону распределенной [1].

Существует 7 видов пластиковых отходов (рис. 1), но в качестве материала для 3D-печати подходят три из них:

1. PET (PETE) – полиэтилентерефталат – самый распространенный вид пластика.

Как правило, из него делают бутылки для напитков, растительных масел, кетчупов, очищающих жидкостей и т. д.

Переработка полиэтилентерефталата методом экструзии осуществляется при 280–300 °C, что является температурной границей, близкой к температуре разложения полиэтилентерефталата (290–350 °C). Повышенная температура может при переработке приводить к частичной де-

Рис. 1. Виды пластиковых отходов

струкции полимера, в ходе которой выделяются побочные продукты, ухудшающие свойства полиэтилентерефталата.

2. PEHD (HDPE) – высокоплотный полиэтилен низкого давления.

Из данного полимера производят упаковки шампуней, гелей для душа, моющих средств для посуды, косметических средств и т. д. Некоторые марки HDPE не теряют своих свойств при температурах ниже 250 °C. При температуре выше 120 °C HDPE выделяет токсические вещества, поэтому при 3D-печати этим полиэтиленом необходима хорошая вентиляция.

Особенности использования в 3D-печати:

– большая усадка, нужно учитывать некоторую деформацию моделей после печати;

– низкая адгезия, приводящая к тому, что следующий слой материала плохо сцепляется с предыдущим. Данная проблема решается либо высокой скоростью печати, либо установкой тепловой пушки, которая будет поддерживать температуру слоя на приемлемом уровне;

– температура плавления колеблется в районе 130–145 °C, а температура застывания – в районе 100–120 °C.

3. PP – полипропилен.

Из полипропилена изготавливают пищевые контейнеры, шприцы, часто используется для изготовления инженерных пластмасс и т. д. Минимальная температура плавления полипропилена – 160 °C, однако для 3D-печати температура должна быть существенно выше.

Особенности использования в 3D-печати:

– полипропилен прилипает к холодной области печати, поэтому рекомендуется использовать нагреваемые платформы;

– полипропилен имеет большую усадку – от 1,3 до 2,4 %. Нужно учитывать, что подобный недостаток часто приводит к деформациям моделей;

– несмотря на то, что полипропилен начинает плавиться при температуре 160 °C, комфортная печать может быть достигнута только при температуре от 220 °C и выше. Минимальная температура печати составляет 208–210 °C – дальнейшее понижение температуры ведет к проблемам с выдавливанием [2].

Исходя из проблемы предлагается разработать систему установок, которая позволит получать материал для 3D-печати из пластиковых отходов групп 1, 2 и 5.

Открытом доступе сети Интернет присутствует мало информации на данную тематику, так как она только набирает обороты, но нужно обратить внимание на систему [3]. Производители системы заявляют, что их производственная линия позволяет печатать на 3D-принтере объекты стоимость которых ниже приблизительно в 100 раз относительно аналогичных изделий, произведенных из коммерческих полимерных волокон.

Измельчение пластика осуществляется при помощи шредера, это позволяет сократить площадь, отведенную для хранения перерабатываемого пластика, ускорить процесс плавления полимеров в экструдере, а также позволяет упростить очистку и сортировку пластиковых отходов разных видов.

Исходя из видов воздействия на измельчаемый объект можно разделить шредеры на следующие группы:

- разрезающие или разрывающие (одновальные, двухвальные и четырехвальные);
- сдавливающие (щековые и конусные);
- ударные (молотковые и роторные) [4].

Для работы с пластиком и в виду отсутствия больших мощностей для переработки целесообразно будет выбрать конструкцию разрезающего и разрывного действия с одним валом. Он имеет небольшие размеры, не требует большого момента силы на вал измельчителя, удовлетворяет потребность в дроблении материала методом разрыва, ведь пластик достаточно мягок относительно горных пород и для его измельчения неприменим метод сдавливания. Также преимуществом такого шредера является простая кинетическая схема, меньшая вибрация и шум, более простая конструкция и меньшая стоимость деталей, простота реализации и сборки относительно других видов шредера [5].

На начальном этапе была разработана 3D-модель одновального шредера с разрывным воздействием в программном комплексе САПР SolidWorks (рис. 2). Помимо этого, был рассчитан максимально достигаемый момент нагрузки на вал шредера при работе с полимерами, произведен расчет самого вала и подобран электродвигатель [6].

После измельчения пластик подвергается очистке – измельченная пластиковая крошка засыпается в барабан с очищающей смесью и, подобно стиральной машине происходит процесс очистки пластика, затем пластиковая масса промывается и при необходимости отправляется на повторную сортировку.

Повторная сортировка осуществляется по принципу разности плотностей полимеров, изменяя плотность воды, например, при помощи соли мы можем добиться такого состояния, когда крошка одного вида пластика окажется на дне емкости, а другая – будет на поверхности. После пройденных операций пластик отправляется сушиться.

Сухая пластиковая смесь из одного вида пластика засыпается экструдер (рис. 3), который позволяет получить пластиковую проволоку для 3D-принтера путем продавливания вязкого рас-

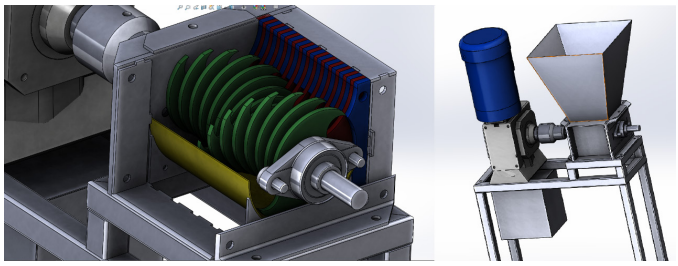


Рис. 2. Одновальный шредер с разрывным воздействием

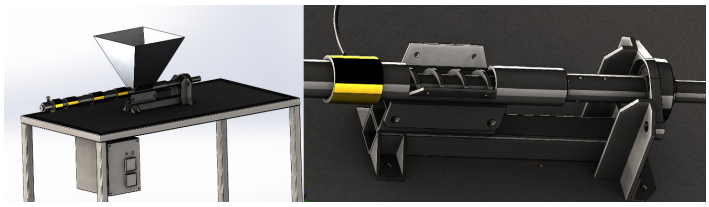


Рис. 3. Экструдер для производства материала 3D-принтера

плава полимера через формующее отверстие. Установка имеет три основных нагревательных элемента и один контрольный, что позволяет плавно нагревать полимеры и выдавливать расплавленный материал в заданных температурных границах. Фильтр на выходе позволяет регулировать диаметр готовой пластиковой нити. Шнек создает движение пластмассы в стволе, а скоростью его вращения можно задать необходимое для качественного продукта давление. Шнек приводится в движение электродвигателем.

Резкое понижение температуры пластиковой нити приводит к ее хрупкости, поэтому выходящий из экструдера материал охлаждается путем обдува до частичного отвердевания во избежание слипания слоев и наматывается на бобину.

Реализация системы производства материала для 3D-печати из переработанного пластика имеет низкую стоимость относительно аналогичных производственных линий, разработанный разборный корпус позволяет наладить производство в производственных помещениях малой площади или в домашних условиях. В дальнейшем планируется рассмотреть замену редуктора на ременную передачу с целью экономии ресурсов и защиты оборудования от заклинивания.

Выводы

Под поставленные задачи была разработана модель системы для переработки пластиковых отходов в материал для 3D-печати. Для дальнейшего развития и изучения этой тематики планируется производство опытного образца. На данном этапе можно сказать, что это направление является перспективным в силу масштабности проблемы загрязнения нашей планеты пластиковыми отходами, низкой конкуренцией и низкой стоимостью материала для 3D-печати, полученного таким способом.

Библиографический список

1. *Дубовик О. Л.* Новое законодательство Европейского Союза о предотвращении загрязнения окружающей среды отходами, содержащими макро- и микрочастицы пластика // Международное право и международные организации / International Law and International Organizations. 2019.

2. *Баур Э., Оссвальд Т., Рудольф Н.* Настольная книга переработчика пластмасс. Справочник по полимерным материалам. СПб., 2021.

3. The new raw – промышленная система переработки пластиковых отходов в материал для 3D-печати. URL: https://thenewraw.org/Work (дата обращения: 15.01.2022).

4. Дробилки и шредеры для пластика – виды измельчителей, принципы работы и цены. URL: https://rcycle. net/plastmassy/oborudovanie-pl/drobilki-i-shredery-dlya-plastika-vidy-printsip-raboty-tsena (дата обращения 10.01.2022).

5. Особенности выбора шредера для пластика: разновидности, принцип работы, цена. URL: https://regionvtormet.ru/metally/osobennosti-vybora-shredera-dlya-plastika-raznovidnosti-printsip-raboty-tsena. html (дата обращения 10.01.2022).

6. *Исаков К. С., Павлюков Д. А., Соболева Л. В.* Расчет окружных, радиальных и аксиальных усилий на вал для переработки пластика. XVI Международ. конф. по электромеханике и робототехнике (молодежная секция). СПб., 2021.

УДК 621.3.019.34

Е. А. Комарова*
ассистент
М. С. Романова*
ассистент
И. В. Елтышева*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Рассмотрены вопросы важности надежного, качественного, бесперебойного электроснабжения, связь экономических потерь и недостаточной надежности, а также мероприятия, реализуемые для повышения надежности электроснабжения.
Ключевые слова: *надежность, электроснабжение, потребление электроэнергии, качество, проблемы.*

E. A. Komarova*
Assistant
M. S. Romanova*
Assistant
I. V. Eltyisheva*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

INCREASING THE RELIABILITY OF POWER SUPPLY

The issues of the importance of reliable, high-quality, uninterrupted power supply, the relationship between economic losses and insufficient reliability, as well as measures taken to improve the reliability of power supply are considered.
Keywords: *reliability, electricity supply, electric energy demand, quality, problems.*

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах все параметры, обеспечивающие выполнение требуемых функций в заданных условиях эксплуатации [1, с. 11].

Применяя термин «надежность» к электроснабжению, необходимо учитывать их размерность (это могут быть как отдельные электроприемники, так и их группа), неразрывность и практически полное совпадение во времени таких процессов как производство, распределение и потребление электроэнергии [2, с. 31].

Поэтому под надежностью электроснабжения понимается способность электрической системы обеспечивать присоединенных к ней потребителей электрической энергией заданного качества в соответствии с их категорией в любой интервал времени.

Повышение надежности электроснабжения, усовершенствование методов эксплуатации электрооборудования в системах электроснабжения являются одним из важнейших факторов, оказывающих влияние на экономику [3, с. 7]. Выделяют ущерб, который был нанесен потребителю, и ущерб, которая понесла энергосберегающая организация, а именно:

1) поломка и порча оборудования, инструмента и другого инвентаря;

2) брак готовой продукции, некачественная работа;

3) перерыв электроснабжения, простой ресурсов и их недоиспользование;

4) временные издержки вследствие упущенной выгоды из-за недовыпуска продукции;

5) затраты на внеплановые работы: демонтаж, транспортировка и ремонт оборудования;

6) затраты на компенсацию недовыработанной продукции для своевременного выполнения плана выпуска продукции.

Недостаточная надежность приводит к огромным затратам на изготовление и монтаж сети, аварийному простою, низкому уровню производительности, моральным ущербам, а нередко и к человеческим жертвам. Нарушение режима электроснабжения приводит также к увеличению потерь электроэнергии из-за отклонения режима работы от нормального.

Поскольку надежность неотрывно связана с экономической составляющей, то решение проблемы основывается на обеспечение заданного соотношения затрат на надежность и ущерба от отказов по критерию [4, с. 50]:

$$И_п = (З_{п.н.} + У) \to \min,$$

где $И_п$ – издержки потребителя на надежность электроснабжения;

$З_{п.н.}$ – затраты потребителя на обеспечение надежности;

У – ущерб из-за отказов электроснабжения.

На надежность энергосистемы оказывают влияние мероприятия, осуществляемые на всех стадиях жизненного цикла, как в период сооружения, так и при эксплуатации этой системы.

Важность учета такого фактора, как надежность, доказывает крупная авария, произошедшая 25 мая 2005 года, затронувшая несколько энергосистем, в том числе Московскую, Тульскую, Калужскую и т. д. [5, с. 51]. На несколько часов была отключена подача электроэнергии в районах, остановлена работа городского, общественного транспорта, сотни людей стали «заложниками» метрополитена, лифтов, которые оказались остановлены. Авария привела к отключению потребителей мощностью 2500 МВт. Первое небольшое возгорание возникло на станции «Чаплино» на одном из шести автотрансформаторов, после его ликвидации питание было подключено на оставшиеся пять трансформаторов. Однако на следующий день произошло возгорание четырех трансформаторов с выбросом масла, в результате чего загорелась трава. Оставшийся один трансформатор в рабочем состоянии не мог обеспечивать бесперебойную подачу электроэнергии всех подключенных потребителей. В сложившемся режиме работы линии 220 кВ питающие этот район оказались перегруженными. 25 мая, не выдержав нагрузки, разрушился последний трансформатор. Вся подстанция окончательно встала, что привело к сбоям и разрыве работы Московского энергокольца и во всей объединенной с ним энергосистеме европейской части России. Согласно расследованию, причинами развития аварии служили ряд наложенных факторов [6]: устаревшее оборудование, отсутствие резервных источников, недостаток в Московской энергосистеме комплекса оборудования и программного обеспечения, позволяющие обеспечивать возможность приема и передачи информации для принятия экстренных мер при ликвидации аварии, отсутствие противоаварийной автоматики и программного обеспечения.

В 2010 году в Санкт-Петербурге 40 % жителей остались на час без электричества из-за аварии на подстанции «Восточная». В результате нештатной ситуации были обесточены водопроводные станции, жители некоторых районов остались без воды, встали троллейбусы, прекратилось радиовещание, произошел серьезный сбой в графике движения метрополитена. На подстанции в результате технологического сбоя произошло обесточивание шести секций шин 330 кВ, и именно авария на подстанции послужила причиной отключения электричества [7, с. 14].

Таким образом, обеспечение надежного, качественного и бесперебойного электроснабжения невозможно без проведения своевременных ремонтов и реконструкции оборудования. В 2018 году Министерство энергетики РФ утвердило схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2018–2024 годы [8]. Основными целями и задачами данной программы является обеспечение надежного функционирования единой энергетической системы России в долгосрочной перспективе. Развитие магистральных и распределительных сетей с учетом требований по обеспечению компенсации реактивной мощности будет связано с решением такого типа задач как обеспечение надежного внешнего электроснабжения новых крупных потребителей и существующих.

В 2022 году «Россети Ленэнерго» – крупнейшая электросетевая компания страны планирует совершить ремонт и реконструкцию 330 высоковольтных линий электропередачи 35–110 кВ, расположенных на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Данные виды работ будут включать в себя замену более 52 км провода и 54,4 км грозозащитного троса, 57 опор и свыше 27 тысяч изоляторов. Реконструкция линий позволит повысить надежность энергоснабжения таких крупных потребителей, как ГК «Кировский завод», АО «Ленинградский металлургический завод», ООО «Ленинградский электромашиностроительный завод», и других предприятий [9].

В 2021 году «Россети Ленэнерго» реализовали ремонтную программу высоковольтных линий электропередачи в полном объеме. Было модернизировано 334 воздушных линий электропередачи на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Это позволило обеспечить надежность электроснабжения 118 системообразующих организаций города и области.

28 октября 2020 году было подписано распоряжение о проведение пилотного объекта по повышению надежности электроснабжения с применением новых технологий в электроэнергетике [10]. Предполагается создание виртуальной модели объекта и процессов для выдвижения

предположений о том, что будет происходить с оригиналом. Одной из основных целей пилотного проекта является повышение надежности, главным образом, без увеличения тарифной нагрузки на потребителей. Новые технологии и производственные процессы должны быть не только экономически выгодными, повышение надежности должно быть связано с применением отечественной цифровой техники, которая позволит контролировать технологические нарушения электроснабжения потребителей с применением онлайн-систем, то есть без непосредственного участия человека.

Пилотный проект позволит протестировать возможность осуществления мониторинга качества электроснабжения потребителей. Также целью данного проекта является определение оптимальных технических решений, улучшающих показатели надежности. Цели и задачи пилотного проекта соответствуют Стратегии развития электросетевого комплекса РФ, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 3 апреля 2013 года. Для принятия участия в отборе пилотного проекта необходимо предоставить два варианта программы повышения надежности и осуществления мониторинга качества электроэнергии на период до 10 лет с аргументированием предельных затрат и целевых показателей на последний год реализации проекта.

Первый вариант пилотного проекта должен быть реализован с использованием существующих технологий. Второй – с использованием перспективных технологий.

Основными векторами прогресса должны стать показатели средней продолжительности отключения потребителей (во втором сценарии этот показатель должен быть не менее, чем в два раза выше показатели из первого сценария), показатель средней частоты отключения потребителей (во втором сценарии этот показатель должен быть не менее, чем в два раза выше показатели из первого сценария). Технологические потери электроэнергии в втором варианте должны быть не менее чем на 5 % ниже, чем в первом варианте. Еще одним условием второго сценария пилотного проекта должно быть наличие автоматизированной системы объективного контроля показателей надежности и качества электроснабжения с определенным порядком предоставления Министерству энергетики РФ и органам исполнительной власти субъектов РФ в области государственного регулирования тарифов доступа к данным. Также необходимо продумать, реализовать и обосновать во втором сценарии экономический эффект по отношению к первому сценарию, где необходимо уменьшить затраты на реализацию второго варианта проекта не менее, чем на 10 % по отношению к первому сценарию.

Таким образом, целью созданного проекта является повышение надежности качества электроснабжения потребителей, существенное улучшение показателей надежности, обоснованность и реализуемость системы объективного контроля показателей надежности, а также гарантированный экономический эффект.

Потребление электроэнергии растет во всем мире. В соответствии с прогнозом спроса на электрическую энергию в России на период 2018–2024 годов среднегодовой прирост энергопотребления на данный период составит 1,22 %. Поэтому в настоящее время перед энергетическими компаниями страны ставятся множество задач, приоритетными из которых являются повышение надежности и качества электроснабжения. Для реализации намеченных планов по развитию электрической системы намечается ввод воздушным линий напряжением 220 кВ и выше протяженностью 14946,9 км, трансформаторной мощности 67 876,3 МВА за период 2018–2024 годов. Надежное электроснабжение потребителей – это приоритетная задача для всех энергетиков.

Библиографический список

1. *Шишмарев В. Ю.* Надежность технических систем: учебник для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2021. 289 с.

2. *Сивков А. А., Сайгаш А. С., Герасимов Д. Ю.* Основы электроснабжения: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2022. 173 с.

3. *Непомнящий В. А.* Экономические потери от нарушений электроснабжения потребителей. М.: МЭИ, 2010. 188 с.

4. *Папков Б. В., Шарыгин М. В.* Требования к решению проблемы надежности электроснабжения // актуальные проблемы надежности и структуры энергетических систем. 2015. № 2. С. 47–54.

5. *Бирюлин В. И., Евдокимов Е. Н.* мероприятия по увеличению надежности электроснабжения потребителей путем введения эксплуатационного фактора для источников питания // энергетическая безопасность. сборник научных статей III Международ. конгресса: в 2 т. Курск, 2020. С. 50–56.

6. Отчет по расследованию аварии в ЕЭС России, произошедшей 25.05.2005 // Калугаэнерго-финанс. URL: http://www.kef.ru/art_010. shtml (дата обращения: 30.01.2022).

7. *Арцишевский Я. Л., Земцов А. А., Востроκнутов С. А.* Обеспечение надежности и качества электроснабжения // Электроэнергия. Передача и распределение. 2010. № 3 (3). С. 14–18.

8. Приказ минэнерго России от 28.02.18 № 121 «Об утверждении схемы и программы развития единой энергетической системы россии на 2018–2024 годы» URL: https://minenergo. gov.ru/node/11323 (дата обращения: 30.01.2022).

9. Россети Ленэнерго. «Россети Ленэнерго» модернизируют 330 высоковольтных линий электропередачи в 2022 году. URL: https://rosseti-lenenergo.ru/press/projects/132778. html (дата обращения: 30.01. 2022).

10. Правительство Российской Федерации распоряжение от 28 октября 2020 года № 2801-р «Улучшение надежности и качества электроснабжения потребителей электрической энергии за счет внедрения новых технологий и оптимизации деятельности территориальных сетевых организаций». URL: http:// government.ru/docs/all/130588/ (дата обращения: 30.01.2022).

УДК 621.314.6 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-177-182**

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

ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ РЕЗИДЕНТНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ И ДОКОВЫХ СТАНЦИЙ

Рассмотрены системы энергообеспечения резидентных подводных роботов и подводных доковых станций с использованием электрохимического генератора, с использованием химической энергии морской воды и с использованием подводной приливной электростанции. Показана возможность эффективного преобразования энергии морских течений в электрическую энергию и использования этой энергии для заряда аккумуляторных батарей подводной доковой станции. Разработанное техническое решение защищено патентом Российской Федерации.
Ключевые слова: *резидентные подводные роботы, подводная приливная электростанция, химическая энергия, электрохимический генератор.*

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

POWER SUPPLY OF RESIDENT UNDERWATER ROBOTS AND DOCKING STATIONS

Considered power supply systems for resident underwater robots and underwater docking stations using an electrochemical generator, using chemical energy of sea water and using an underwater tidal power plant. The possibility of effective conversion of the energy of sea currents into electrical energy and the use of this energy to charge the batteries of the underwater docking station is shown. The developed technical solution is protected by a patent of the Russian Federation.
Keywords: *Resident underwater robots, underwater tidal power plant, chemical energy, electrochemical generator.*

Введение

Области практического применения подводных роботов и робототехнических комплексов неуклонно расширяются. К наиболее перспективным областям применения подводных роботов и робототехнических комплексов можно отнести [1]:

– составление карт подводного рельефа;

– исследование морских течений;

– проведение экологического мониторинга;

– проведение проектно-изыскательских работ при укладке трубопроводов или освоении подводных месторождений;

– проверка и ремонт трубопроводов и глубоководных кабелей;

– очистка дна от потенциально опасных объектов;

– обеспечение безопасности акваторий морских и прибрежных объектов;

– ликвидация последствий аварий и чрезвычайных ситуаций и др.

Развитие подводной робототехники привело к появлению нового направления, получившего название резидентная робототехника [1]–[3]. Резидентные робототехнические комплексы работают без использования судов сопровождения в автономном режиме. Основу резидентной робототехники составляют резидентные автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА). Резидентные подводные роботы и робототехнические комплексы нуждаются в собственном источнике энергии для независимой от внешних источников работы под водой.

В качестве первичных источников электроэнергии подводных аппаратов и роботов наибольшее применение находят аккумуляторные батареи различных типов. Широкое применение в настоящее время находят никель-кадмиевые, никель-металгидридные и литиевые аккумуляторные батареи, обладающие наилучшими характеристикам. Однако системы энергообеспечение с аккумуляторными батареями имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что общий объем системы энергообеспечения подводного робота в этом случае составляет 40–70 % от объема полезной нагрузки всей подводной робототехнической системы (РТС).

Повышение энергоемкости и уменьшение размеров системы энергообеспечения подводных РТС в настоящее время стало одной из актуальных задач современной подводной робототехники.

Решение этой задачи может быть достигнуто как подбором оптимальных компонентов для аккумуляторных батарей, так и созданием первичных источников энергии, включая и нетрадиционные источники энергии, обладающих характеристиками, удовлетворяющими требованиям подводной робототехники [4]–[8].

Рассмотрим несколько перспективных систем энергообеспечения резидентных роботов и робототехнических комплексов, обладающих лучшими по сравнению с аккумуляторными батареями масса-габаритными характеристиками и обеспечивающими увеличение автономности работы подводного аппарата.

Система энергообеспечения подводного робота и доковой станции с использованием электрохимического генератора

Использование в качестве первичного источника электрической энергии подводного робота электрохимических генераторов (ЭХГ) позволяет снизить объем системы энергообеспечения в 2–3 по сравнению с системами энергообеспечения с аккумуляторными батареями. Работа ЭХГ основана на преобразовании химической энергии водородного топлива в электрическую энергию постоянного тока [9].

Имеются практические примеры использования систем энергообеспечения подводного робота с электрохимическим генератором. В качестве примера можно привести электроэнергетическую систему АНПА проекта «САРМА-Д». Журнал оборонно-промышленного комплекса «Военно-технический сборник. Бастион» (19 мая 2019 г.) сообщает, что «в рамках комплексного проекта «САРМА-Д» предстоит разработать подводный необитаемый аппарат с исключительными возможностями автономного плавания за счет применения в его конструкции новейшей воздухонезависимой энергетической установки». Воздухонезависимая энергетическая установка в проекте «Сарма-Д» предназначена для периодического дозаряда аккумуляторной батареи во время автономного плавания подводного аппарата. Дозаряд аккумуляторной батареи выполняется за счет энергоресурсов, размещенных на подводном аппарате. В состав воздухонезависимой энергетической установки входит электрохимический генератор, преобразующий химическую энергию водорода и кислорода в электрическую энергию. Водород и кислород, закаченные под высоким давлением в баллоны, являются носителями химической энергии. По словам руководителя проектной группы, такой двигатель будет дешевле, экономичнее и экологичнее ядерных энергоустановок подводных аппаратов. АНПА, оснащенные ЭХГ, смогут автономно решать задачи подо льдами Арктики в течение нескольких месяцев, в частности, обеспечивать безопасность плавания по Северному морскому пути и проводить сейсморазведку. На первом этапе работ АНПА будет оснащен энергоемкой литий-ионной аккумуляторной батарей, в последующем предполагается использование в аппарате гибридной энергоустановки на базе современных образцов электрохимических генераторов и криогенной системы хранения энергокомпонентов.

К недостаткам систем энергообеспечения с ЭХГ следует отнести чрезмерно высокие затраты на создание ЭХГ. Стоимость топливного элемента ЭХГ составляет от 3 до 5 тысяч долларов США за 1 кВт установленной мощности, что существенно ограничивает мощность электрохимических генераторов АНПА. При проектировании систем энергообеспечения АНПА с ЭХГ следует также учитывать падающий характер вольт-амперной характеристики генератора и зависимость вида ее от продолжительности работы (рис. 1).

Очевидно, что баллоны с водородом и кислородом по мере их выработки необходимо заменять. Для выполнения этой операции АНПА должен быть поднят на борт судна сопровождения, что существенно усложняет и удорожает процесс практической реализации системы энергообеспечения с ЭХГ. В настоящее время уделяется повышенное внимание разработке систем энергообеспечения подводных роботов, свободных от этого недостатка. В основу работы этих систем положено использование энергии Мирового океана для энергообеспечения резидентных подводных роботов и робототехнических комплексов.

Система энергообеспечения подводного робота с использованием химической энергии морской воды

В журнале Angewandte Chemie опубликованы результаты разработки системы энергообеспечения подводных роботов, использующей прямое электрохимическое извлечение энергии из морской воды. Работы выполнена группой китайских ученых и инженеров. Новый генератор, который подобно морским организмам может переключаться между аэробным и анаэробным режимом, используя различные материалы в ка-

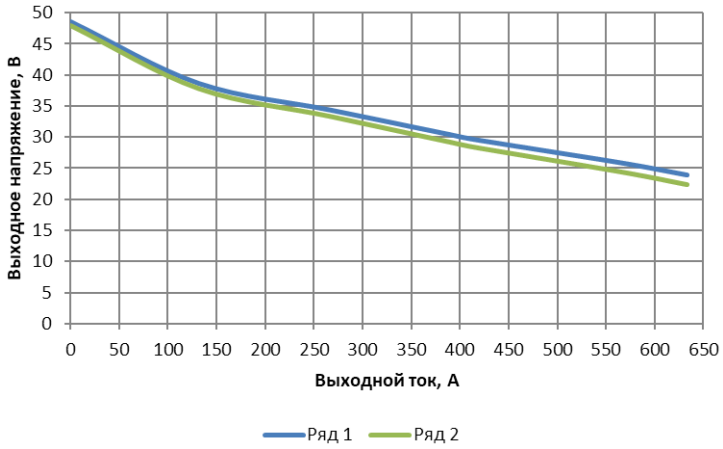


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики ЭХГ: ряд 1 (верхняя кривая) – в начале ресурса ЭХГ; ряд 2 (нижняя кривая) – в конце ресурса ЭХГ

честве акцепторов электронов. Разработанная система способна давать как постоянную мощность, так и кратковременные импульсы повышенной мощности, причем система переключается между двумя режимами автоматически.

Основой устройства является катод с использованием прусской сини открытой каркасной структуры с цианид ионами в виде «стоек» и ионами железа в качестве «узлов», которые могут легко принимать и высвобождать электроны. В сочетании с металлическим анодом эта структура может использоваться для выработки электроэнергии из морской воды. Если потребность в мощности мала, электроны, поступающие в катод, переносятся непосредственно в растворенный кислород. Однако концентрация растворенного кислорода в морской воде низкая. При возрастании мощности и тока должно увеличиваться число электронов, но на катоде недостаточно кислорода, чтобы сразу же принять все поступающие электроны. В этом режиме прусская синь должна принимать и хранить эти электроны, уменьшая степень окисления атомов железа с 3 до 2. Для поддержания баланса заряда положительно заряженные ионы натрия оседают в рамках. С другой стороны, поскольку растворенный кислород в морской воде неисчерпаем, то теоретически можно обеспечить питание при слабом токе в течение неограниченного времени. Эта новая система, как сообщает Science Daily, очень устойчива к агрессивной морской среде, выдерживает многочисленные переключения режимов и способна работать четверо суток без перерыва. При включении металл-органических структур, теоретическая плотность энергии устройства составляет 3960 Втч/кг (BitCryptoNews.ru).

Энергообеспечение подводной доковой станции от подводной приливной электростанции

Рассмотрим устройство и принцип работы подводной приливной электростанции, преобразующей энергию морского течения в электрическую энергию, используя материалы патента РФ № 203188 [10]. На рис. 2 приведена конструктивная схема приливной электростанции с подводной доковой станцией, а на рис. 3 приведена конструктивная схема генератора подводной приливной электростанции.

Подводная приливная электростанция содержит электрический генератор, выполненный по кольцевой схеме, с размещенными внутри полости ротора 1 двумя винтами 2, причем один винт установлен навстречу морского потока прилива, а другой установлен навстречу морского потока отлива (рис. 3).

Статор электрического генератора 3 размещен в металлическом каркасе генератора 4, на торцах которого установлены конусные устройства, образующие на входе потока воды конфузор 5, а на выходе – диффузор 6, сверху каркаса генератора 4 закреплен корпус поплавка 7. К боковым сторонам каркаса генератора 4 и корпуса поплавка 7 закреплены проушины 8 для размещения каркаса генератора 4 и корпуса поплавка 5 на опорных стойках 9, верхние концы которых скреплены балками 10, а нижние концы закреплены на фундаменте 11. На этом фундаменте размещена также и доковая станция 12. Электрическая энергия, вырабатываемая генератором 4, передается в доковую станцию по кабель-тросу 13. Подводная приливная электростанция содержит четыре вертикальные опорные стойки 8, закрепленные в фундаменте 11.

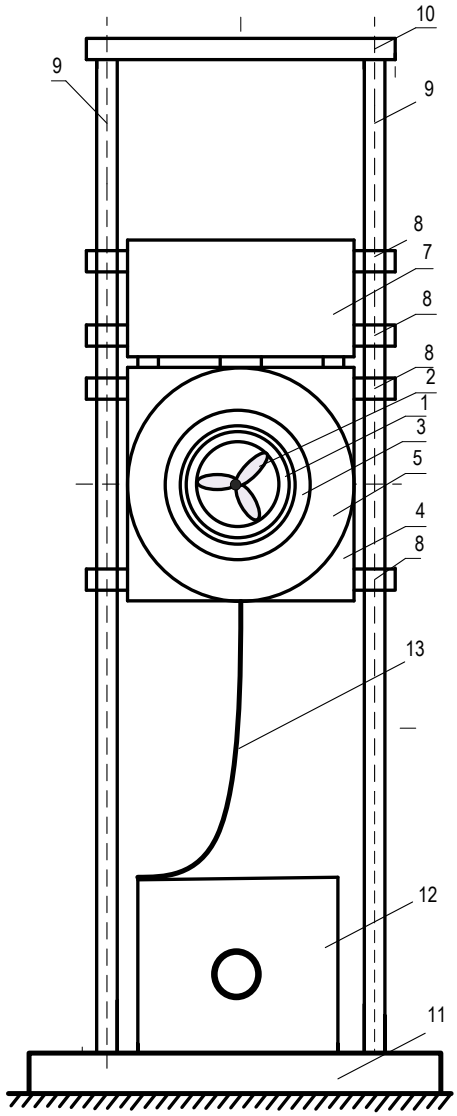


Рис. 2. Конструктивная схема приливной электростанции с доковой станцией

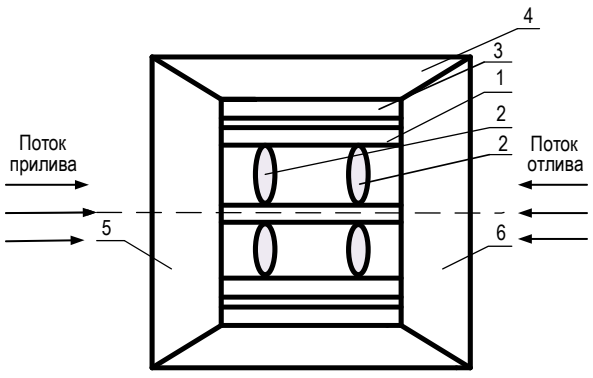


Рис. 3. Конструктивная схема генератора подводной приливной электростанции

Генератор работает при наличии морских течений прилива или отлива следующим образом. Выталкивающая сила поплавка 7 и герметичных полостей каркаса генератора 4 поднимают генератор приливной электростанции к верхним слоям морского течения на заданную глубину заглубления. Морское течение прилива или отлива проходит через конусное устройство конфузор 5 в полость ротора 1 с размещенными там винтами 2 и выходит через конусное устройство диффузор 6. При прохождении морского потока через конфузор 5 скорость потока увеличивается, что приводит к увеличению скорости вращения винтов и повышению эффективности преобразования энергии морского течения в электрическую энергию. Винты 2 жестко соединены с ротором и при своем вращении приводят в движение ротор генератора 1, на внешней поверхности которого размещены постоянные магниты генератора.

При вращении постоянных магнитов их магнитные силовые линии пересекают проводники обмотки статора 3 и наводят в них трехфазную систему ЭДС переменного тока:

– на обмотке статора 1 наводится ЭДС $e_1 = E_m \sin\omega t$;

– на обмотке статора 2 наводится ЭДС $e_2 = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3)$;

– на обмотке статора 3 наводится ЭДС $e_3 = E_m \sin(\omega t - 4\pi/3)$,

где $E_m = 4{,}44\Phi f W_ф$;

$W_ф$ – число витков одной фазы;

Φ – магнитный поток одного полюса индуктора;

f – частота ЭДС, генерируемой в обмотке статора;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота ЭДС, генерируемой в обмотке статора.

Таким образом, механическая энергия морского потока преобразуется в электрическую энергию. Напряжение, снимаемое с обмоток генератора, передаются по кабелю в подводную доковую станцию. Глубина заглубления генератора по отношению к уровню морской поверхности зависит от величины выталкивающей силы поплавка и герметичных полостей каркаса генератора. Объем поплавка и герметичных полостей каркаса генератора должен быть больше массы подвижной части приливной электростанции. При выполнении этого условия часть поплавка всегда находится над поверхностью моря, а корпус генератора – в потоке морского течения. При приливе и отливе изменяется расстояние между морской поверхностью и дном. При этом каркас генератора и корпус поплавка вместе с закрепленными на них проушинами, через которые пропущены опорные стойки, перемещаются вертикально верх – вниз

вдоль опорных стоек. Жесткость конструкции приливной электростанции обеспечивается за счет закрепления опорных стоек на фундаменте и скрепления их сверху балками.

Мощность $P_г$, генерируемая синхронной машиной, определяется с учетом эффективности работы генератора и винта [11]:

$$P_г = \eta_г \cdot \eta_т \cdot P_п, \quad (1)$$

где $P_п$ – мощность потока воды, поступающего на лопасти винта, Вт; $\eta_г$ – КПД генератора, значение $\eta_г$=0,85–0,95; $\eta_в$ – КПД винта, значение $\eta_в$=0,5–0,7;

$$P_п = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H, \text{ Вт}, \quad (2)$$

где ρ – плотность воды, равна 1000 кг/м^3; g – ускорение свободного падения, равно 9,81 м/с^2; Q – расход воды, м^3/с; H – скоростной напор потока воды, м;

$$Q = S_т \upsilon_п, \quad (3)$$

где $S_в$ – площадь сечения, через которое проходит поток воды на лопасти винта, м^2. Скоростной напор потока воды H можно определить по формуле

$$H = \upsilon_п^2 / 2g. \quad (4)$$

С учетом значений параметров, приведенных выше, мощность потока можно определить по формуле

$$P_п = 0{,}5 \cdot \rho \cdot S_т \cdot \upsilon_п^3, \text{ Вт}. \quad (5)$$

При установке насадки конической формы на каркас генератора, как показано на рис. 3, и отношении диаметра входного отверстия насадки к диаметру входного отверстия полости ротора равным, например, 2:1, отношение площадей сечений входного и выходного отверстий насадки составит 4:1, следовательно, скорость морского потока в полости ротора при установки такой насадки увеличится в 4 раза по отношению к скорости морского потока вне насадки, а мощность морского потока увеличится в 64 раза.

Приведем пример расчета генератора при следующих параметрах:

– размер диаметра лопастей винта D=0,5 м;

– скорость морского потока $\upsilon_п$=3,084 м/с= 11,1 км/час;

– плотность воды ρ=1000 кг/м^3.

Площадь, ометаемая лопастями турбины $S_Т$ определяется с учетом известного значения диаметра лопастей винта D:

$$S_т = \pi \cdot D^2 / 4 = 0{,}1963 \text{ м}^3.$$

Определим величину мощности морского потока, поступающего в полость винта без насадки конической формы:

$$P_п = 0{,}5 \cdot \rho \cdot S_т \cdot \upsilon_п^3 = 0{,}5 \cdot 1000 \cdot 0{,}1963 \cdot \upsilon_п^3 = 98{,}17 \cdot \upsilon_п^3, \text{ Вт}.$$

Мощность, генерируемая электрическим генератором $P_г$ с учетом минимально возможных значений КПД генератора $\eta_г$=0,9 и винта (турбины) $\eta_в$=0,5 в этом случае составит

$$P_п = 0{,}9 \cdot 0{,}5 \cdot 98{,}17 \cdot \upsilon_п^3 = 44{,}17 \upsilon_п^3, \text{ Вт}.$$

При значении скорости морского потока в полости винта $\upsilon_п$=3,084 м/с электрический генератор способен генерировать мощность

$$P_г = 44{,}17 \cdot 3{,}0843 = 44{,}17 \cdot 29{,}332 =$$

$$= 1295 \text{Вт} = 1{,}295 \text{кВт} \approx 1{,}3 \text{ кВт}.$$

Таким образом, при установки насадки конической формы на капсуле электрический генератор будет генерировать мощность величина которой в 4^3=64 раз больше исходной, то есть $P_г$=1,3*64=83,2 кВт. Расчет параметров генератора следует вести на мощность 83,2 кВт.

Определим основные размеры электрического генератора.

Скорость вращения винта, а значит и скорость вращения ротора электрического генератора, можно определить по формуле:

$$n = \upsilon_п / h, \text{ об/с}, \quad (6)$$

где h – шаг винта.

Принимаем отношение шага винта h к диаметру h/D=1,1, определим величину шага винта $h=(h/D) \cdot D$=1,1·0,5=0,55 м.

Скорость вращения ротора электрического генератора при скорости потока составляет $\upsilon_п$=3,084 м/с составляет

$$n = \upsilon_п / h = 3{,}084 / 0{,}55 = 5{,}607 \text{ об/с} = 336{,}42 \text{ об./мин}.$$

При установке насадки на входе турбины скорость потока увеличится и будут равна $\upsilon_п$=3,084*4=12,336 м/с, а скорость вращения ротора электрического генератора составит

$$n = \upsilon_п / h = 12{,}336 / 0{,}55 = 22{,}42 \text{ об/с} = 1345 \text{ об. /мин}.$$

Из теории электрических машин [12] известно, что основные размеры электрической машины связаны с электромагнитной мощностью машины соотношением:

$$D^2 l = P_{эм} \cdot 60 / (n \cdot k \cdot A \cdot B_{\delta max}), \quad (7)$$

где $D^2 l$ – объем, ограниченный активной поверхностью расточки статора электрического генератора, м^3;

$P_{эм}$ – электромагнитная мощность электрического генератора, *ВА*;

A – линейная нагрузка электрического генератора, *А*/м;

$B\delta_{max}$ – индукция в зазоре между магнитопроводами статора и ротора, Тл;

n – скорость вращения ротора, об. /мин.;

k – коэффициент;

l – длина (толщина набора электротехнической стали) магнитопровода статора генератора, м.

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 $k=6{,}43$.

Из приведенного ранее расчета следует, что электромагнитная мощность генератора должна быть не менее $P_{эм}=83200$ *ВА* при скорости вращения ротора, равной $n=1345$ об. /мин.

С учетом рекомендаций, приведенных в [12], принимаем значения

$$B\delta_{max}=0{,}745 \text{ Тл}, A=1{,}7\cdot 10^4 \text{ А/м};$$

$$D^2 l = 83200\cdot 60 / (1345\cdot 6{,}43\cdot 0{,}745\cdot 1{,}7\cdot 10^4) =$$

$$= 455{,}76\cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Поскольку величина диаметра уже принята ранее, $D=0{,}5$ м, то длина магнитопровода статора электрического генератора составит:

$l=455{,}76\cdot 10\text{-}4/0{,}25=1823\cdot 10^{-4}$ м=18,23 см.

Заключение

Рассмотрены системы энергообеспечения резидентных подводных роботов и подводных доковых станций с использованием электрохимического генератора, химической энергии морской воды и подводной приливной электростанции. Показана возможность эффективного преобразования энергии морских течений в электрическую энергию и использования этой энергии для заряда аккумуляторных батарей подводной доковой станции. Разработанное техническое решение энергообеспечения подводной доковой станции с использованием подводной приливной электростанции защищено патентом Российской Федерации.

Библиографический список

1. *Волошин С. Б., Драгомощенко Ф. О., Занин В. Ю.* Аспекты применения гетерогенных групп робототехнических комплексов повышенной автономности, в том числе из состава обсерваторий, с целью получения океанографических данных и их дальнейшего использования для освоения Арктической зоны: сб. работ лауреатов Международ. конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на освоение и развитие Арктики и континентального шельфа 2020 года. С. 62–75.

2. *Занин В. Ю., Маевский А. М., Кожемякин И. В.* Использование морской робототехники в задачах оперативной океанографии: отечественный и зарубежный опыт. Морские информационно-управляющие системы. 2020. № 1 (17). С. 84–90.

3. *Занин В. Ю., Маевский А. М* Разработка элементов подводных робототехнических резидентных систем на примере отечественного автономного необитаемого подводного аппарата интервенционного класса и сопутствующих технологий: сб. работ лауреатов Международ. конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа 2019 года. С. 14–22.

4. *Гайкович Б. А., Занин В. Ю., Тарадонов В. С.* Концепция роботизированной подводной сейсморазведки в подледных акваториях: сб. работ лауреатов Международ. конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа 2018 года. С. 64–87.

5. *Маевский А. М., Гайкович Б. А.* Разработка гибридных автономных необитаемых аппаратов для исследования месторождений углеводородов // Научно-технический сборник вести газовой науки. 2019. № 2 (39). С. 29–40.

6. *Мартынов А. А.* Энергообеспечение подводных аппаратов // Завалишинские чтения'21: сб. докладов. СПб.: ГУАП, 2021.

7. Патент RU 2724197. Способ энергообеспечения подводного аппарата и устройство для его реализации; опубл. 2020.06.22.

8. Патент РФ № 2750396. Система энергообеспечения подводного аппарата; опубл. 2021.06.28.

9. *Мартынов А. А., Крутяков Е. А., Самсыгин В. К.* К выбору схемы полупроводникового преобразователя для согласования напряжений электрохимического генератора и нагрузки // Труды Крыловского Государственного научного центра. СПб., 2015. С. 209–227.

10. Патент РФ № 203188. Подводная приливная электростанция; опубл. 2021.03.25.

11. *Кусков А. И.* Разработка и исследование мобильной гидротурбинной установки для энергообеспечения и водоснабжения сельскохозяйственных объектов: дис. ... на соискание ученой степени канд. техн. наук. Специальность 05.20.02. М., 2015.

12. *Вольдек А. И.* Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. М.: Энергия. 1974. 840 с.

УДК 621.31 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-183-189**

А. В. Ольховский*
магистрант
О. Я. Солёная*
кандидат технических наук, доцент
А. В. Куликовская*
ассистент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АВТОНОМНОЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ

В статье рассматриваются конструктивные особенности и способы применения альтернативных источников электрической энергии при проектировании эффективных систем электроснабжения предприятий.
Ключевые слова: *возобновляемые источники энергии, автономные системы электроснабжения, газопоршневые электростанции.*

A. V. Olkhovskiy*
Postgraduate Student
O. Y. Solenaya*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. V. Kulikovskaya*
Assistant
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

AUTONOMOUS POWER SUPPLY OF ENTERPRISES

The article discusses the design features and methods of using alternative sources of electrical energy in the design of efficient power supply systems for enterprises.
Keywords: *renewable energy sources, autonomous power supply systems, gas piston power plants.*

Научно-технологический прогресс (НТП) в современном мире открывает дополнительные возможности для потребителей, порождая новые виды бизнеса. Стремительное развитие технологий приводит к изменениям как в сегментах потребления электрической энергии, так и в сегментах производства и поставок. При этом постепенно модифицируются сами схемы и механизмы работы энергетических систем.

Тенденция развития технологий генерации в электроэнергетике берет свое начало с XXI века. Энергетическое производство возросло с 330 млн т. н. э. в 2000 году до 723 млн т. н. э. в 2014 году (прирост с 9 до 14 %).

Для обеспечения надежного электроснабжения предприятий необходимо внедрение автономных систем электроснабжения (АСЭ). АСЭ могут быть возобновляемыми или регенеративными источниками энергии.

Газопоршневые электростанции

Большим преимуществом пользуются электростанции автономного типа. Они являются более технологичными, так как в их основе лежит использование газопоршневых двигателей внутреннего сгорания.

Газопоршневые электростанции (ГПС) превосходят другие ПС, поскольку они известны своим высоким электрическим КПД (40–45 %) [1]. Также необходимо помнить про надежность конструкции и массогабаритные показатели, которые являются весьма компактными, позволяющие использовать ГПС на предприятиях с труднодоступным или удаленным географическим расположением. ГПС может функционировать в режиме когенерации. Данные электростанции обогревают промышленные объекты за счет выхлопных газов, температура которых на выходе достигает 390 °С. При выработке 1 МВт электричества получается 1 МВт теплоэнергии, то есть пропорция выражается в соотношении 1:1, что значительно увеличивает КПД системы.

Газопоршневая электростанция представляет собой электроустановку, которая базируется на единой раме и состоит из синхронного генератора и первичного двигателя, жестко соединенных муфтой. Предназначена такая установка для па-

раллельного использования с электрической сетью, в качестве стационарного источника питания электроэнергии или в автономном режиме.

В качестве приводной системы выступает газопоршневой V-образный четырехтактный двенадцатицилиндровый двигатель с искровым зажиганием и турбонаддувом с промежуточным охлаждением, оснащенный воздушным фильтром с индикатором загрязнения фильтра (рис. 1).

Двигатель преобразует химическую энергию газового топлива (природный газ) во вращательную энергию коленчатого вала. Пуск двигателя совершается по средствам электрического стартера, питание которого производится от аккумуляторной батареи.

Для снижения уровня вибрации между двигателем и рамой установлены демпфирующие антивибрационные пластины.

В качестве генератора переменного тока выступает синхронная электрическая машина с явнополюсным ротором, который соединен с коленчатым валом двигателя.

Топливная система двигателя включает в себя: карбюратор, турбокомпрессор, охладитель смеси после турбокомпрессора, дозирующую заслонку и регулятор нулевого давления газа внутренней системы топливообразования двигателя. Даная конфигурация обеспечивает автоматическое поддержание оптимального соотношения газа и воздуха в топливной смеси.

В качестве топлива используется природный газ с удельной теплотой сгорания от 31,5 до 41,2 МДж/нм^3 и метановым числом не менее 75 единиц. Подключение к линии осуществляется посредством газовой рампы (рис. 2).

В качестве смазки двигателя выступает замкнутая система с мокрым картером, которая включает в себя: насос с приводом от двигателя, масляный поддон, водомасляный теплообменник, масляные фильтры, щуп и заливную горловину. Двигатель оснащен насосом предварительной смазки и предпусковым подогревателем масла. Подача масла в двигатель осуществляется автоматически, посредством перетока масла из бака по достижению заданного уровня в системе контроля уровня, установленного на двигателе.

Для более эффективного использования тепловой энергии охлаждения воды рубашки двигателя, охлаждения масла и топливной смеси используется система охлаждения двигателя (рис. 3).

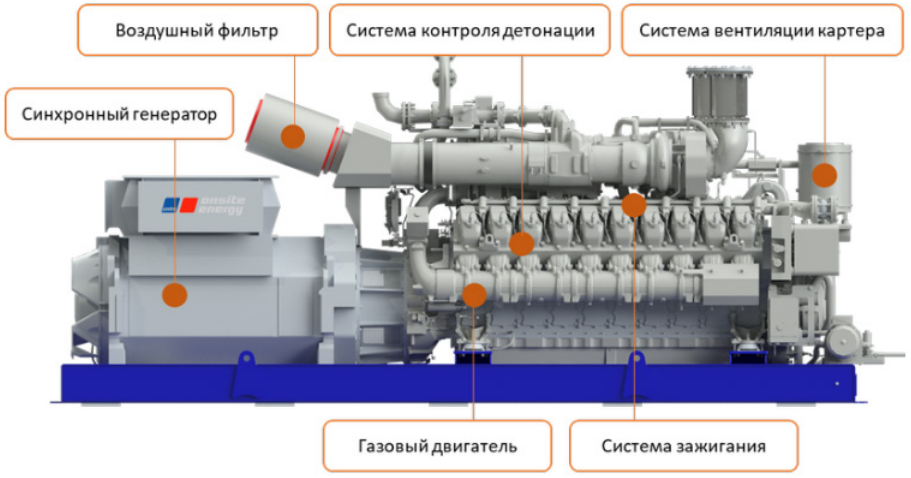


Рис. 1. Конструкция газопоршневой установки

Рис. 2. Конструкция газовой рампы

Рис. 3. Конструкция системы охлаждения

Рис. 4. Конструкция системы утилизации тепла

Теплоотбор осуществляется в виде горячей воды с температурой 70–85 °С при помощи соответствующих теплообменников. Водогрейный котел-утилизатор дымовых газов кожухотрубного типа устанавливается по ходу выхлопных газов после глушителя выхлопных газов. Котел применяется для эффективного использования тепла выхлопных газов и нагрева горячей воды до необходимой температуры.

Байпас выхлопных газов состоит из двух клапанов – с механической связью и электрическим приводом – и подключается к системе управления двигателя. Главная цель заключается в распределении расхода выхлопных газов между системой утилизации тепла выхлопных газов и байпасным газоходом, в зависимости от режима работы установки. Байпас выхлопных газов активизируется, если данные газы используются не полностью или совсем не используются.

Для снижения уровня шума выхлопа двигателя система оснащена глушителем выхлопных газов (разработан для остаточного уровня звукового шума 65 дБ в 10 м, измеряемом в выхлопной трубе) (рис. 4).

Биологическое топливо

Биогаз производится посредством анаэробного брожения биомассы или в ходе термохимических процессов и также может быть использован в качестве топлива для ГПС. Обычно классифицируют четыре вида биогаза по способам получения:

- свалочный газ;
- газ сточных вод;
- биогаз, полученный из других источников в результате брожения (в частности, в ходе ферментации органических отходов и энергетических культур);
- биогаз, полученный в результате сильного нагрева (чаще в качестве сырья рассматриваются отходы биомассы, например, при деревообработке или бытовые отходы).

Четвертая технология, основанная на термохимических процессах, рассматривается в качестве перспективной, но пока стадию коммерциализации не прошла. Она предполагает нагрев сырья до температур 700–1500 °С с последующим отделением отходов и синтетического газа, который после процедур фильтрации и охлаждения превращается в биометан. Построено несколько пилотных заводов в разных странах ЕС, главной целью которых является апробация и отработка технологий (рис. 5).

Три первых технологии основаны на хорошо изученных методах анаэробного брожения, однако потенциал для технологического совершенствования применяемого оборудования и схем работы остается достаточно большой.

В состав биогаза входит 50–85 % метана, что предопределяет его ценность как энергоресурса.

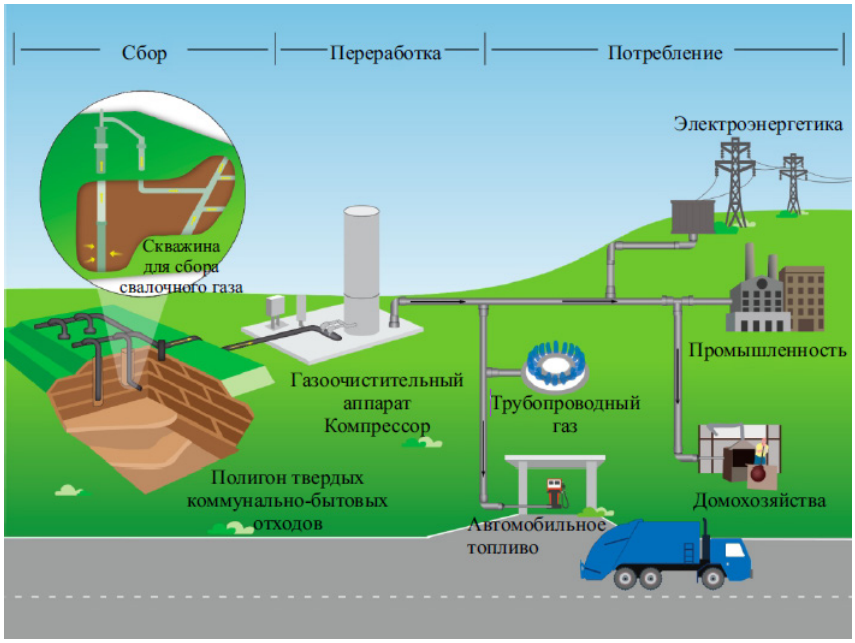


Рис. 5. Схема получения и использования свалочного газа

Однако наличие других компонентов в большинстве случаев требует применения очистки перед использованием.

Технология получения биогаза методом анаэробного брожения во многих случаях предполагает наличие биогазовой установки в виде емкости, внутри которой и происходит процесс брожения. Значительно отличается от такого подхода технология производства свалочного газа, где исходной емкостью фактически служит весь полигон. Процесс подготовки полигона направлен не только на получение биогаза, но и на минимизацию ущерба окружающей среде от поступающих отходов. При этом целесообразно этим отходам предварительно пройти этап сортировки с отделением всех составляющих, пригодных для повторной переработки. Полигон оборудуют на месте естественного или специально вырытого углубления, которое накрывают мембраной и слоем глины, не позволяющими попадать в почву и грунтовые воды вредным продуктам гниения. При загрузке отходов производят трамбовку, а сверху накрывают еще одним изоляционным слоем (например, глины) во избежание рассеивания. Сверху идет покрытие мембраной и еще одним защитным покрытием, например, слоем почвы. Впоследствии бурятся скважины, монтируются трубы и насосное оборудование. Получаемый газ проходит процедуры очистки и может использоваться для различных целей.

Во многих случаях стимулом для производства биогаза являются не только энергетические потребности, но и решение проблем, связанных с сырьем для его производства. В частности, это касается использования свалочного газа, перепроизводства навоза, утилизации пищевых отходов и невостребованных энергетических культур.

Достаточно активно начал развиваться бизнес в сфере малых биогазовых установок, которые применяются на небольших объектах, в частности домохозяйствах. С их помощью есть возможность получать тепло и электроэнергию на основе биогаза, вырабатываемого из бытовых отходов и продуктов жизнедеятельности.

С экономической точки зрения большой интерес биогаз представляет для мест, где по разным причинам отсутствует централизованное энергоснабжение и все альтернативы достаточно дороги. Достаточно сильно перспективы биогаза зависят от платежеспособности потребителей. В одних местах получается вполне приемлемая экономика, а в других не обойтись без поддержки и дотаций. В качестве примера целевых программ поддержки можно привести Africa Biogas Partnership Programme, которая направлена на обеспечение энергией 500 тыс. людей в африканских странах. По состоянию на середину 2018 года уже 320 тыс. из них получили доступ к энергии посредством биогаза.

Комбинированные системы

Производство электроэнергии происходит путем расхода топлива, цены на которое могут быть весьма высокими. Для экономии топлива и

увеличения надежности используют комбинированные системы электроснабжения.

Наиболее удачным решением комбинированных систем является использование газопоршневых станций с ветроэлектрическими установками (ВЭУ).

Совместная работа ГПС и ВЭУ является недостаточно эффективной для использования ВИЭ, так как доля участия ВЭУ в системе по мощности не должна превышать 15–20 % мощности ГПС. Такой режим можно используется в комбинированных установках большой мощности для экономии топлива. Однако использование режима раздельной работы позволяет поднять долю участия ВЭУ более 50–60 %. В этом случае неизбежно усложнение АСЭ за счет необходимости введения автоматической системы управления [2].

В рамках усовершенствования работы ветроэнергетической установки допускается объединение в одной конструкции ВЭУ и солнечной фотоэлектрической установки (СФЭУ). Такое решение позволяет создать АСЭ с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками небольшой мощности, так как в зимнее время существует большой потенциал ветра, а летом в ясные дни максимальный эффект можно получить, используя СФЭУ (рис. 6). Сочетание данных ресурсов является весьма выгодным для потребителей с экономической точки зрения.

Фотоэлектрические установки применяются как на уровне крупных электростанций, так и на уровне небольших распределенных генерирующих объектов. Данные установки преобразуют солнечную энергию в электрическую энергию за счет фотоэлектрических преобразователей. Рассматривается много вариантов развития технологий в области фотовольтаики, направленных на уменьшение затрат на производство и повышение потребительской привлекательности решений. Среди них:

- применение бескремниевых технологий;
- двусторонние модули;
- панели, совмещенные с конструктивными элементами зданий (встроенные в черепицу, окна и т. д.);
- модули, установленные на транспортных средствах и встроенные в бытовые приборы.

Считается, что потенциал к сокращению затрат есть и при использовании прочего оборудования на электростанциях. Потенциал для дальнейшего сокращения стоимости производства электроэнергии из солнечной энергии оценивается в пределах 50 % к 2040 году.

Расчетная мощность ВЭУ и СФЭУ определяется с учетом графика нагрузок, ветровых потоков и солнечной активности для конкретного региона. В составе АСЭ должны быть предусмотрены резервные источники электроэнергии АКБ. При этом каждый из режимов работы должен обеспечивать пиковую нагрузку.

Суммарная мощность подключаемой нагрузки переменного тока определяется номинальной мощностью автономного инвертора (АИ). Иногда потребители могут кратковременно при включении (пуск электрических машин) потреблять мощность, значительно превосходящую номинальную. Поэтому для стабильной работы АСЭ автономные инверторы необходимо выбирать с номинальной мощностью на 30–50 % больше суммарной мощности подключенных потребителей. При большом количестве и разнообразии мощности потребителей целесообразно разбить автономные источники и инверторы на группы. Кроме того, следует отметить, что иногда более целесообразно строить ветро-солнечную электростанцию с использованием нескольких менее мощных ВЭУ, чем на основе одной с большой мощностью, так как упрощается процесс монтажа электростанции и повышается ее надежность.

Гибридные электростанции подразумевают совместное использование традиционных и ВИЭ. Практически к структурным схемам ветро-газопоршневых и ветро-солнечных электростанций также могут быть подключены к шинам переменного тока и традиционные источники электроэнергии: бензо-, дизельные и газопоршневые электростанции [3], [4].

ВЭУ и СФЭУ могут использоваться совместно с микрогидроэлектростанциями. В таких си-

Рис. 6. Ветро-солнечная электростанция

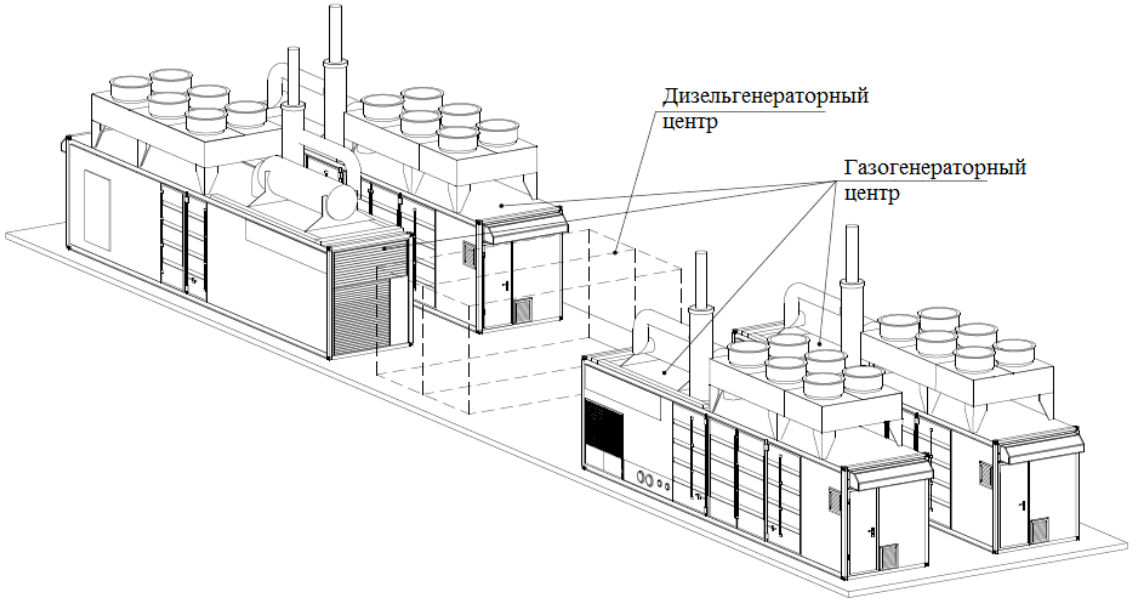


Рис. 7. Автономная система электроснабжения на базе ГПЭ

стемах обычно определяется основной источник электроэнергии в зависимости от наличия ветрового потока, солнечной радиации или напора и расхода воды. К примеру, в период ветрового затишья энергия вырабатывается микрогидроэлектростанцией или СФЭУ. Здесь важно комбинировать работу ВИЭ с учетом эксплуатационных затрат и сроком службы оборудования (до капитального ремонта и предельный срок службы).

Перспективным регионом для внедрения АСЭ с использованием ВИЭ являются южные регионы Российской Федерации, имеющие значительные ресурсы ветровой и солнечной энергетики [5]. В северных регионах активно применяются газопоршневые электростанции совместно с дизельными генераторами (рис. 7).

Реализация данного проекта позволяет обеспечить производство электрической мощностью в 4 МВт посредством четырех, закольцованных, газопоршневых электростанций, а также организовать аварийное резервирование при помощи двух дизельных генераторов. Также большой интерес использования газопоршневых электростанций представляет для мест, где по разным причинам отсутствует централизованное энергоснабжение и все альтернативы достаточно дороги.

Технологии на стороне спроса

Как мы видим, технологии потребления энергии развиваются по широкому спектру направлений. На энергетику развитие данных технологий оказывает воздействие по нескольким направлениям, ключевыми из которых являются:

- повышение эффективности использования энергии;
- изменение приоритетов при выборе источников энергообеспечения;
- изменение режимов энергопотребления, включая воздействие на пиковые показатели.

Одним из очевидных трендов, происходящих в секторах потребления (бытовом, коммерческом и промышленном) под влиянием технологического прогресса, является расширение доли использования электроэнергии. Электроэнергия – более универсальный источник энергии, и современные технологии позволяют достаточно эффективно применять ее в системах регулирования температур воздуха и воды, причем в отдельных случаях с учетом полных затрат на различные решения, что является более экономически оправданным. В первую очередь из секторов конечного потребления электроэнергия вытесняет уголь, далее конкуренция разворачивается с природным газом.

Благодаря новым техническим решениям расширяются возможности для автономного энергоснабжения, что открывает дополнительные ниши в сегментах потребления.

Библиографический список

1. Возобновляемые источники электроэнергии: монография / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, Р. А. Сулейманов и др. Краснодар: КубГАУ, 2012. 272 с.

2. *Никитенко Г. В., Коноплев Е. В.* Ветроэнергетические установки в системах автономного электроснабжения: монография / Ставропольский государственный аграрный университет. Ставрополь, 2008. С. 152.

3. *Никитенко Г. В., Коноплев Е. В., Коноплевм П. В.* Оценка вариантов автономного электроснабжения сельскохозяйственных потребителей // Техника в сельском хозяйстве. 2012. № 1. С. 16–17.

4. Современное состояние производства электроэнергии возобновляемыми источниками в мире и России / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, А. С. Пономаренко, Ю. В. Кондратенко // Труды КубГАУ. 2012. № 6. С. 159–163.

5. Перспективы развития мировой энергетики с учетом влияния технологического прогресса / Под ред. В. А. Кулагина. М.: ИНЭИ РАН, 2020. 320 с.

УДК 621.314.24

Н. С. Перетятько*
студент
М. В. Сержантова*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

В данной статье рассмотрены особенности работы гибридных транспортных средств. Проанализированы методы генерации и аккумулирования электрической энергии в современных гибридах. Выявлена и обоснована необходимость в использовании дополнительных преобразовательных устройств в системе гибридного автомобиля. На основе проведенного исследования автором предлагается метод накопления, ранее не используемой электрической энергии.
Ключевые слова: *гибридные установки, рекуперация в гибридных установках, повышение эффективности гибридных автомобилей, экономия топлива в гибридах.*

N. S. Peretyatko*
Student
M. V. Serzhantova*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

IMPROVING THE EFFICIENCY OF HYBRID VEHICLES USING CONVERSION DEVICES

This article discusses the features of hybrid vehicles. Methods of generation and accumulation of electric energy in modern hybrids are analyzed. The necessity of using additional Converter devices in the hybrid car system is identified and justified. Based on the research, the author suggests a method for accumulating previously unused electrical energy.
Keywords: *hybrid installations, recovery in hybrid installations, improving the efficiency of hybrid cars, fuel economy in hybrids.*

Введение

Гибридные транспортные средства все больше приобретают популярность на данный момент времени. Связано это с тем, что современное общество заинтересовано в снижении использования дорогостоящего топливного сырья и сокращении выбросов отработанных газов в атмосферу.

Неоспоримым преимуществом в использовании гибридных силовых установок над привычными для нас ДВС, является их энергоэффективность. В основном оно проявляется в городских условиях, где механизмы автомобилей работают на малых или средних скоростях с динамичными ускорениями и частыми торможениями.

Сравнение режимов работы гибридных установок были проведены Ф. Орекчини в статье «Энергопотребление полного гибридного транспортного средства последнего поколения по сравнению с обычным транспортным средством в реальных условиях движения», в которой сравнивались Toyota Yaris Hybrid и обычная Toyota Yaris с бензиновым 1,5-литровым двигателем [2]. Исследование показало сильное снижение потребления топлива с использованием гибридного транспортного средства, что является доказательством актуальности взятого во внимание вопроса.

Несмотря на имеющиеся достоинства гибридных силовых установок, важно продолжать изучение способов повышения эффективности и увеличения запаса хода автомобиля.

Экономия топлива в гибридных установках достигается, прежде всего, из-за высокой эффективности торможения системой рекуперации [1]. В данной статье мы рассмотрим один из способов сохранения остаточной выходной энергии путем трансформации до необходимых параметров и последующего накопления в аккумуляторных батареях.

Основная часть

Объектом исследования является автомобиль Тойота Приус. Приус – это первый в мире массовый гибридный легковой автомобиль, производимый японской корпорацией Тойота с 1997 года.

Гибридный силовой привод построен таким образом, что позволяет и бензиновому двигателю, и электромотору непосредственно подключаться к ведущим колесам автомобиля и взаимодействовать между собой. При такой схеме каждый из моторов работает в режиме наибольшей эффективности, за счет чего и обеспечивается низкий расход топлива и малая токсичность выхлопа бензинового двигателя. Кроме этого, в приводе имеются генератор, преобразователь электрического тока и аккумуляторная батарея.

Тип схемы гибрида представлен на рис. 1 [3].

Для полного понимания процесса работы системы проведены исследования характеристик данной модели, произведен обзор: конструкции; стендовых электрических испытаний; испытаний на обратную электродвижущую силу (ЭДС); испытаний на потери; испытаний на полную проектную производительность.

Зависимость обратной ЭДС генератора представлена на рис. 2 [3].

Этот анализ отобразил электрические параметры работы двигателя, генератора и инвертора в полном диапазоне скоростей, для которых эти узлы предназначены в автомобиле Приус.

В систему входит:

– генератор переменного тока синхронного типа, который вращается со скоростью до 10 000 об/мин. При работе на высоких скоростях, по закону электромагнитной индукции генератор обеспечивает необходимую плотность энергии для зарядки аккумулятора. Кроме того, генератор выполняет функцию стартера двигателя. При запуске генератор вращает планетарную передачу в устройстве разделения мощности и тем самым обеспечивает вращение двигателя;

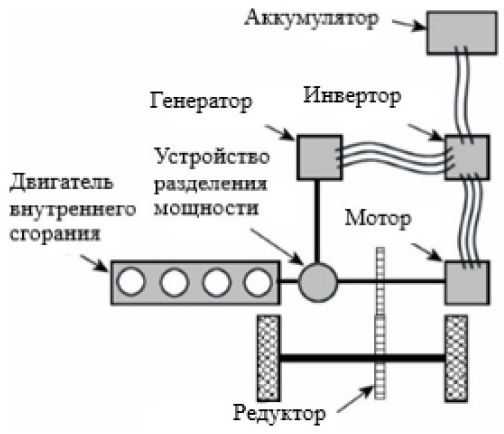


Рис. 1. Совмещенная схема гибридной установки автомобиля Приус

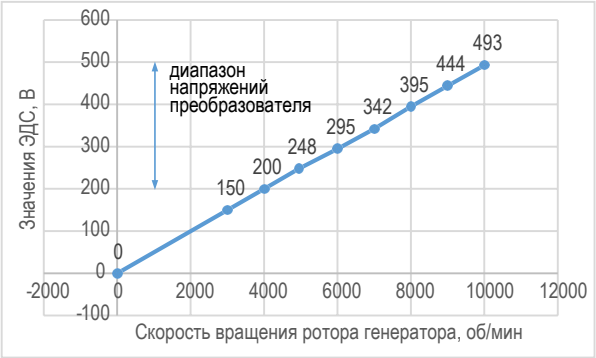


Рис. 2. График обратной ЭДС генератора при скорости до 10 000 об. / мин.

– бесщеточный двигатель постоянного тока. Напряжение питания двигателя до 500 В. Пиковая выходная мощность двигателя составляет 50 кВт. Электродвигатель приводит автомобиль в движение от старта до скорости 80–90 км/ч. При таком диапазоне достигается наибольшая эффективность в использовании электрической энергии;

– блок управления мощностью. Блок представляет собой совокупность преобразовательных устройств, которые направляют выработанную или аккумулированную энергию потребителям, трансформируя ее под необходимые параметры электрической сети;

– компактная высокоэффективная никель-металлогидридная аккумуляторная батарея. Аккумулятор рассчитан на номинальное напряжение 201,6 В. Указанная выходная мощность от аккумулятора составляет 21 кВт.

Блок управления мощностью в свою очередь содержит:

– инвертор, который производит 3-фазный переменный ток для привода двигателя. Используется потому, что аккумулированная электроэнергия имеет постоянную составляющую;

– преобразователь постоянного тока в постоянный, который производит 12 В для вспомогательного оборудования. Данный преобразователь понижает выработанное напряжение значением от 200 до 400 В на напряжение 12 В, необходимое для устройств: мультимедии, кондиционирования, подогрева, подсветки салона и т. д.;

– высоковольтный двунаправленный преобразователь постоянного тока в постоянный, который повышает напряжение батареи 200 В до максимального значения 500 В постоянного

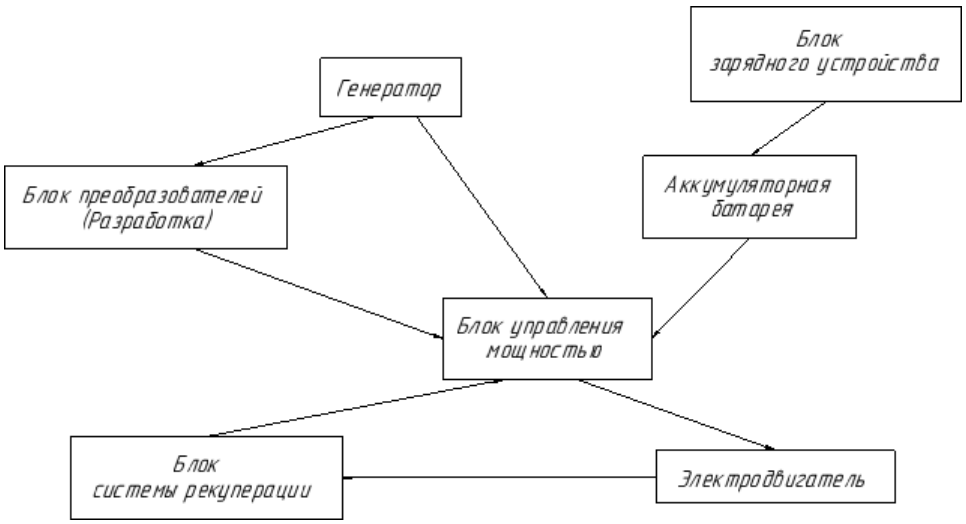


Рис. 3. Местонахождение блокаа преобразователей в схеме

тока или понижает его для того, чтобы зарядить батарею 200 В. То есть электрический ток протекает либо от генератора в аккумулятор, либо от аккумулятора к электромотору.

На основании полученных данных предлагается способ сохранения энергии. Напряжение, вырабатываемое генератором, находящееся ниже порогового значения напряжения (200 В), пропускаемого преобразователем, повышается до необходимого значения отдельным блоком преобразователей. Блок преобразователей устанавливается в цепь между генератором и основным преобразовательным устройством в параллель с основной шиной и включается в работу в те отрезки времени, когда значение вырабатываемого напряжения будет ниже используемого. Предлагаемый метод позволяет использовать вырабатываемые «крупицы энергии», которые ранее не использовались.

Схема, поясняющая работу предлагаемой системы, представлена на рис. 3.

Генератор вырабатывает электроэнергию в диапазоне от 0 до 400 В переменного тока. Часть энергии, от 200 до 400 В, поступает на блок управления мощностью. Другая часть энергии – от около нулевых значений до 200 В – поступает на разработанный блок преобразователей, где она трансформируется до необходимых значений напряжения, а после поступает на блок управления мощностью. Далее энергия поступает в аккумуляторную батарею, заряжая ее.

В случаях, когда аккумулятор не полностью заряжен и у пользователя есть возможность зарядить его от внешней сети, электроэнергия поступает с вилки зарядного устройства в блок зарядного устройства. Последний контролирует процесс заряда аккумулятора и предотвращает его по завершении или в случаях аварийной ситуации. При достаточном объеме электроэнергии в аккумуляторных батареях постоянный электрический ток поступает в блок управления мощностью, где трансформируется в переменный и направляется на контакты электродвигателя. В тех случаях, когда возможна рекуперация, энергия поступает с контактов электродвигателя в блок управления рекуперацией, затем через блок управления мощностью возвращается в аккумулятор.

Что касается сохраненной блоком преобразователей электроэнергии, то ее величина будет небольшой. Это значит, что не стоит ожидать большого увеличения коэффициента полезного действия от гибридной установки. Однако данный метод позволит увеличить дальность хода гибридного автомобиля за счет экономии топлива, часть которого не будет тратиться на генерацию электроэнергии для заряда аккумулятора, питания электромотора или на нужды приборов автомобиля, не участвующих в процессе движения автомобиля.

Заключение

Синергетический эффект снижения расхода топлива и выброса токсичных выхлопных газов гибридной установки достигается за счет сочетания двигателя внутреннего сгорания и электромотора. При этом чем экономичнее гибридный автомобиль, тем более емкие аккумуляторы ему требуются. Одним из вариантов решения этой проблемы является блок преобразования, который предлагается включить в систему для

поддержания напряжения на заданном уровне, что позволит максимально использовать вырабатываемую гибридной установкой энергию. Высокой актуальностью это решение имеет для городского транспорта.

Библиографический список

1. *Orecchini F.* Energy consumption of a last generation full hybrid vehicle comparison with a conventional vehicle in real drive conditions. Italian Thermal Machines Engineering Association, 2018. 8 p.

2. *Murgovski N., Johannesson L., Egardt B.* Comparison of three electrochemical energy buffers applied to a hybrid bus powertrain with simultaneous optimal sizing and energy management / IEEE T Intell Transp 2014; 15:1193–1205.

3. *Staunton R.* Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System. U. S. A. Department of Energy FreedomCAR and Vehicle Technologies, Washington D. C, 2005. 86 p.

УДК: 621.313.04, 621.313.3 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-194-201**

М. В. Сержантова*
кандидат технических наук, доцент
Р. Р. Романюга*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ СЕКЦИЙ СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рассмотрена проблема сохранения геометрических параметров и оптимизации временных и материальных ресурсов секций статорной обмотки. Сравниваются два технологических процесса с различными способами нанесения корпусной изоляции. Первая технология состоит в нанесении корпусной изоляции на секцию статорной обмотки после формовки по технологии Diamond-coil. Второй метод состоит в нанесении корпусной изоляции до формовки по технологии Flat-coil. Представлены результаты в форме графиков испытаний секций статорной обмотки обоих вариантов нанесения корпусной изоляции. Полученные секции прошли проверку геометрических размеров, испытания электрической прочности импульсным постоянным напряжением междувитковой изоляции, переменным напряжением корпусной изоляции. Междувитковые испытания показали, что EAR при изолировке после формовки равно 1,8 %, при изготовлении секций по технологии Flat-coil равно 1,9 %. Оба значения удовлетворяют допустимому уровню, который должен быть меньше максимально допустимого равного 5 %.
Ключевые слова: *обмотка электродвигателя, статор, секции, катушка, испытания.*

M. V. Serzhantova*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
R. R. Romanyuga*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

COMPARISON STUDY OF THE TEST RESULTS OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR'S STATOR WINDING SECTIONS

The paper under discussion is intended to examine the problem of preservation of the geometrical parameters and the optimization of the timing and material resources of the stator winding sections. The author compares two technical processes with different ways of the frame insulation's application. The first technology consists in the applying of the frame insulation on a stator winding section after the molding using the technology Diamond-coil. The second approach involves the applying of the frame insulation before the molding using the technology Flat-coil. The results obtained are shown in the form of diagrams of the stator winding sections' test operations in both ways of the frame insulation's applying. The acquired sections survived a test of the geometry features, a high-voltage test by pulsing direct current voltage of the interturn insulation and by alternating-current voltage of the frame insulation. The interturn insulation test showed that EAR equals 1,8 % by insulation after molding, and equals 1,9 % by producing sections using the technology Flat-coil. Both values fulfill the accepted level which must be less than the maximum accepted level that equals 5 %.
Keywords: *electrical motor winding, stator, sections, coil, test.*

Введение

В асинхронных двигателях в процентном соотношении от общего количества 21 % потерь приходятся на ротор, 21 % на железо, 10 % на трение, 14 % добавочных потерь, а также 34 % на обмотку статора (рис. 1).

Следовательно, сокращение наибольших потерь, приходящихся на обмотку статора, является одним из способов повышения КПД электрической машины. В статье сосредоточим внимание на результатах, полученных при различных технологиях нанесения корпусной изоляции на статорные обмотки.

Первый метод состоит в нанесении корпусной изоляции на секцию статорной обмотки после формовки по технологии с изолировкой после формовки Diamond-coil. Это наиболее распространенный и простой с точки зрения применяемого оборудования процесс. И второй метод с нанесением корпусной изоляции до формовки по технологии Flat-coil. Для оценки эффективности результатов изготовлено по две катушке каждым способом. Секции произведены согласно чертежу, представленному на рис. 2.

Представим алгоритм исследуемого технологического процесса по технологии Diamond-coil.

1. Намотка трека на намоточном станке.

Рис. 1. Распределение потерь мощности при работе асинхронного двигателя

2. Предварительная изолировка трека вручную либо на станке, покровной изоляционной лентой для обеспечения дальнейшей защиты междувитковой изоляции от механических повреждений на этапе формовки и стяжки проводников, витков секции между собой.

3. Формовка трека в катушку определенной формы на растяжном станке, на данном этапе задаются все основные геометрические размеры секции.

4. Нанесение корпусной изоляции вручную (в нашем случае будет использоваться слюдосодержащая лента элмикатерм 524019 0,13×20 мм F – класса нагревостойкости, с соблюдением нахлеста 1\2, и обеспечение необходимого размера и минимального количества слоев – 10).

5. Рихтовка заизолированных секций.

6. Испытания междувитковой и корпусной изоляции.

Представим алгоритм технологического процесса по технологии Flat-coil.

1. Намотка трека на намоточном станке.

2. Нанесение корпусной изоляции на изолировочном станке с последующим нанесением покровной изоляции для защиты корпусной изоляции во время формовки и укладки в статор электродвигателя.

3. Формовка катушки на растяжном станке с приданием финальных геометрических параметров.

4. Испытание междувитковой и корпусной изоляции.

Способы изготовления имеют отличие в этапах изолировки, в первом случае изоляция наносится вручную, во втором – механизировано, с использованием изолировочных станков. Отметим, что треки перед формовкой заизолирова-

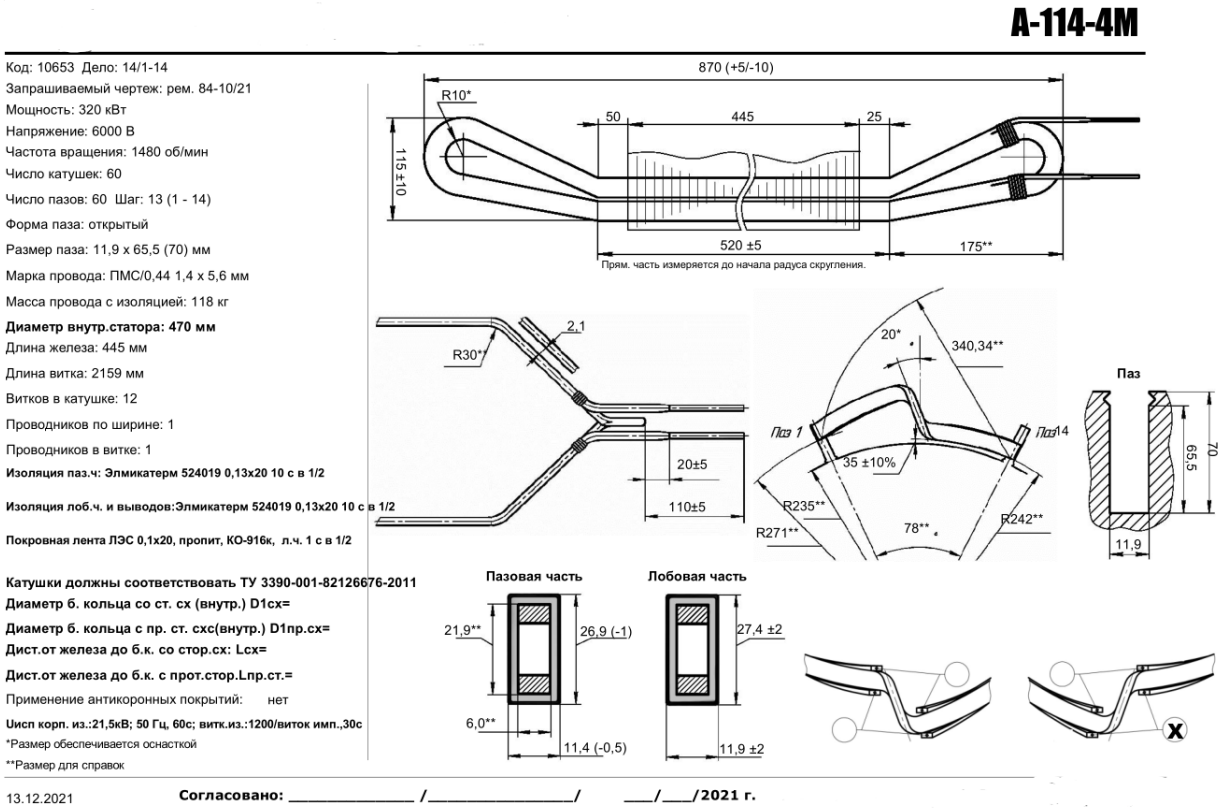


Рис. 2. Чертеж секции А-114-4М

а) б) в)

Рис. 3: а – нанесение корпусной изоляции вручную; б – измерение геометрических размеров лобовой части секции; в – секции, уложенные в макет статора после этапа формовки

ны не одинаково, следовательно, на этапе формовки и после него в процессе изготовления будут иметься отличия в их характеристиках.

Основная часть

При снятие защитной изоляции и нанесении корпусной изоляции на уже отформованную катушку происходит изменение основных геометрических параметров секции, таких как малый, большой подъем, угол наклона пазовых и лобовых частей, что приведет к отсутствию зазоров между лобовыми частями. В дальнейшем это негативно скажется на укладке секций в статор электродвигателя, могут возникнуть проблемы с привязкой лобовых частей к бандажным кольцам, само по себе отсутствие зазоров снизит естественное охлаждение при работе двигателя.

Для корректировки геометрических размеров применяется рихтовка секций до укладки их в статор либо при непосредственной укладке. Рихтовка – это комплекс работ, цель которых исправить какое-либо несоответствие геометрических размеров катушки, отклонений от чертежа, заданных допусков и параметров. Рихтовка производиться при помощи щипцов и киянки, на секции при этом оказывается излишнее механическое воздействие, что может привести к повреждению корпусной изоляции и как следствии пробою во время работы двигателя.

Технологический процесс Flat-coil, в ходе которого изолировка производится до формовки позволяет обойтись без рихтовки секций, обеспечить беспроблемную укладку катушек в статор электродвигателя, следовательно, исключить излишнее механическое воздействие на основную изоляцию секций, что благоприятно скажется на продолжительности работы электродвигателя.

Из минусов данного способа изготовления можно выделить разъезды и провалы изоляции на лобовых частях катушки, которые возникают преимущественно на секциях с высотой столбика лобовой части выше 40 мм, при изолировке лентами с небольшим количеством связующего вещества.

Представим спецификацию, по которой изготовлена обмотка статора.

СПЕЦИФИКАЦИЯ
материалов для изготовления обмотки статора

Марка: А-114-4М Р= 320 кВт n= 1480 об/мин. U= 6000 В, 60 шт

Наименование материала	Ед. изм.	Кол-во на 1 ком-т
Провод ПМС/0,44 1,4 х 5,6	кг.	117,6
Элмикатерм 524019 0,13х20 мм	кг.	31,79
Элмикатерм 524019 0,10х20 мм	кг.	1,501
Стеклолента ЛЭС-Б 0,10х20	м.	1315
Лак БТ-987	кг.	1,305
ПМ-180КО 0,055х20	кг.	0,118
ПМ-А 40/20 0,04х20	кг.	0,289
Фторопласт Ф-4ЭО 0,02х50	кг.	0,289
Код№ 10653		

Рис. 4. Спецификация

Испытания изоляции

Представим результаты испытаний постоянным и переменным током, сопротивление изоляции, коэффициент абсорбции.

Междувитковые испытания проведены на испытательном стенде Schleich MTC2-40. Импульсное напряжение – это кратковременное отклонение напряжения от некоторого постоянного значения.

Испытания производятся быстрым подъемом значения напряжения до максимального и последующим более медленным снижением значения напряжения. На выводные концы катушек в течение 30 секунд подается импульсное постоянное напряжение, строятся графики – синусоида импульсного напряжения, которая должна быть плавной, без резких скачков и про-

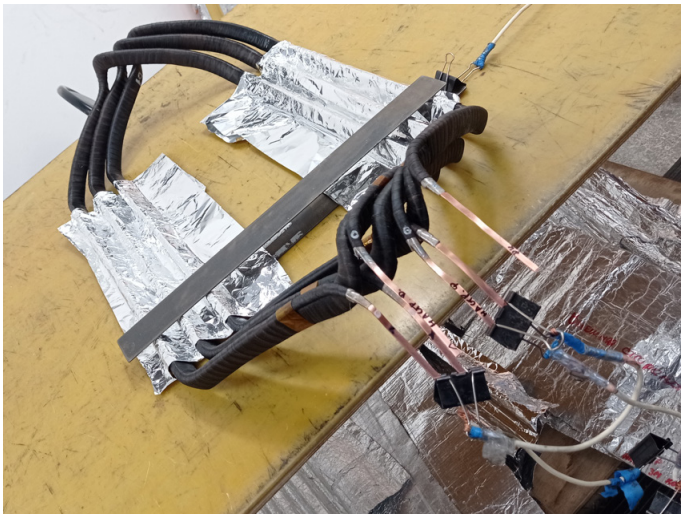


Рис. 5. Испытания корпусной изоляции переменным напряжением

валов. После чего полученные графики сравниваются, а именно разность площадей построенных графиков EAR. Также сравнению подлежать графики разных катушек, разница которых не должна превышать 5 %.

Испытания корпусной изоляции производят синусоидальным переменным напряжением частотой 50 Гц, используя установку АИД-70М. Для испытания электрической прочности изоляции секций обмотки электродвигателя пазовые части катушек кладут на металлические планки равные длине железа двигателя или плотно обертывают лентой из металлической (алюминиевой) фольги на длину равную длине сердечника машины, с подключенным к ним заземлением. Несколько испытываемых катушек одновременно устанавливают на испытательном столе. К выводным концам катушек подключают зажим высокого напряжения, на выводные концы секций в течение 60 секунд подается переменный ток. При этом во время испытаний должен быть минимален ток утечки, не должно быть искрений на углах катушки.

Испытания секций, изготовленных по технологии с изолировкой после формовки

Проведем тестирование изоляции и представим график по результатам испытаний.

Результаты испытаний междувитковой изоляции постоянным током, для выборки из двух катушек приведены в табл. 1.

Важно отметить, что заданное значение подаваемого напряжения на катушку равно 14 400 В, так как в катушке согласно чертежу 12 витков, а мы подаем 1200 В на виток.

Таблица 1

№ п/п	*U* исп/вит	Время, с	Результат
1	1200	30	Пройдено
2	1200	30	Пройдено

Представим результаты импульсного теста в форме графика.

Фактическое подаваемое напряжение равно 14 199 В от заданного 14400 В, отклонение напряжения незначительное и им можно пренебречь. По оси *y* – измеряется величина подаваемого напряжения, по оси *x* – микросекунды.

Графики импульсного теста, проведенного для двух катушек, произведенных с изолировкой после формовки, совпадают со незначительными отклонениями в 1,8 %. EAR (разность площадей построенных графиков), что свидетельсвует о успешном прохождении испытания.

По оси *y* – измеряется величина подаваемого напряжения и сопротивления, по оси *x* – микросекунды.

Коэффициент абсорбции определяет степень увлажнения изоляции, это отношение R60\R15, где R60 – значение сопротивления изоляции, снятое через 60 секунд после подачи напряжения; R15 – значение сопротивления изоляции, снятое через 15 секунд после подачи напряжения.

Проведем испытание корпусной изоляции повышенным напряжением переменного тока в пазовых частях на стенде АИД-70М. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Испытания секций, изготовленных по технологии Flat-coil.

Проведем тестирование изоляции и представим график по результатам испытаний.

Испытательный стенд	SCHLEICH MTC2-40kV | 15786 | Version 1.206.4101	
План испытаний	359 12/21 A-114-4M	
Результат	Годен	
Дата испытания	14.01.2022 13:10:23	
сопротивление	59.32 mOhm (20.0°C), Температура окр. среды =20.7°C	***Провере***
сопротивление	59.16 mOhm (20.0°C), Температура окр. среды =20.7°C	***Провере***
коэф. аб-ции	24014V, Коэф. аб-ции=1.00	***Годен***

Рис. 6. Измерение сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции на катушках с изолировкой после формовки

Импульсный тест			
Шаг	Заданное значение	Фактическое значение	
импульсный тест	14400V EAR=5.0%	14199V EAR=1.8%	Годен

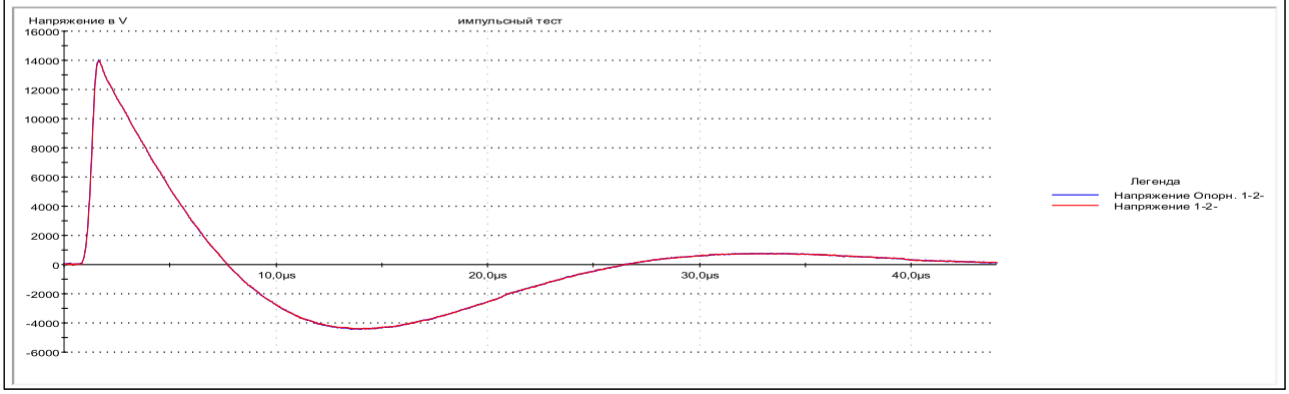


Рис. 7. График импульсного теста

Изоляция DC			
Шаг	Заданное значение	Фактическое значение	
коэф. аб-ции	24000V, 1.00	24014V, Коэф. аб-ции=1.00	Годен

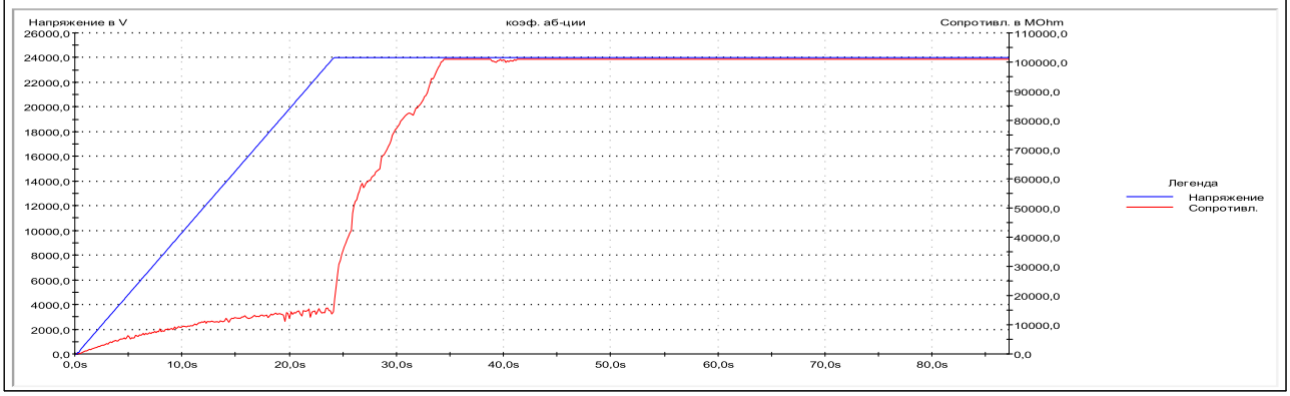


Рис. 8. График измерения коэффициента абсорбции при изолировке после формовки

Испытательный стенд	SCHLEICH MTC2-40kV | 15786 | Version 1.206.4101	
План испытаний	359 12/21 A-114-4M	
Результат	Годен	
Дата испытания	14.01.2022 13:10:23	
сопротивление	58.89 mOhm (20.0°C), Температура окр. среды =20.7°C	***Провере***
сопротивление	58.87 mOhm (20.0°C), Температура окр. среды =20.7°C	***Провере***
коэф. аб-ции	24014V, Коэф. аб-ции=1.00	***Годен***

Рис. 9. Измерение сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции на катушках с изолировкой до формовки

импульсный тест	14400V EAR=5.0%	14264V EAR=1.9%	**Годен**

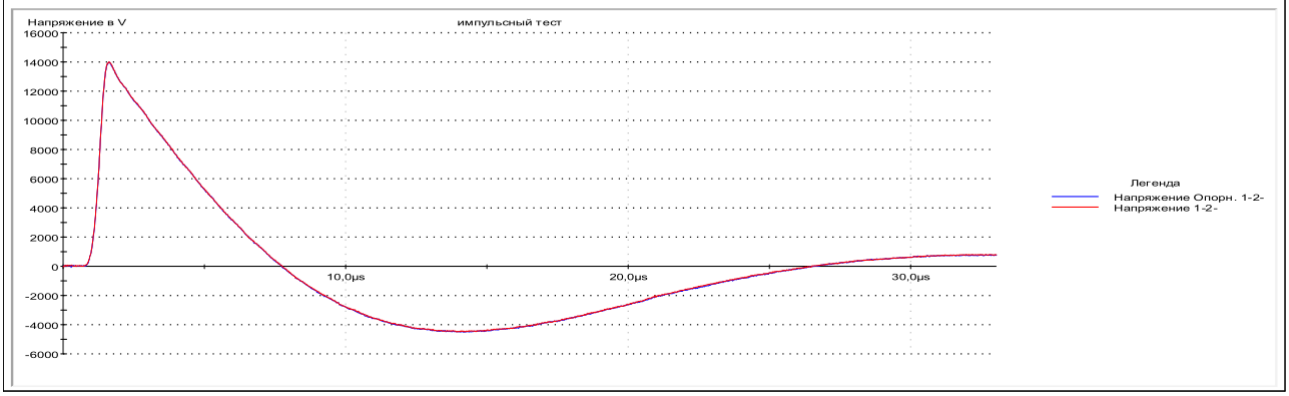


Рис. 10. График импульсного теста

коэф. аб-ции	24000V, 1.00	24014V, Коэф. аб-ции=1.00	**Годен**

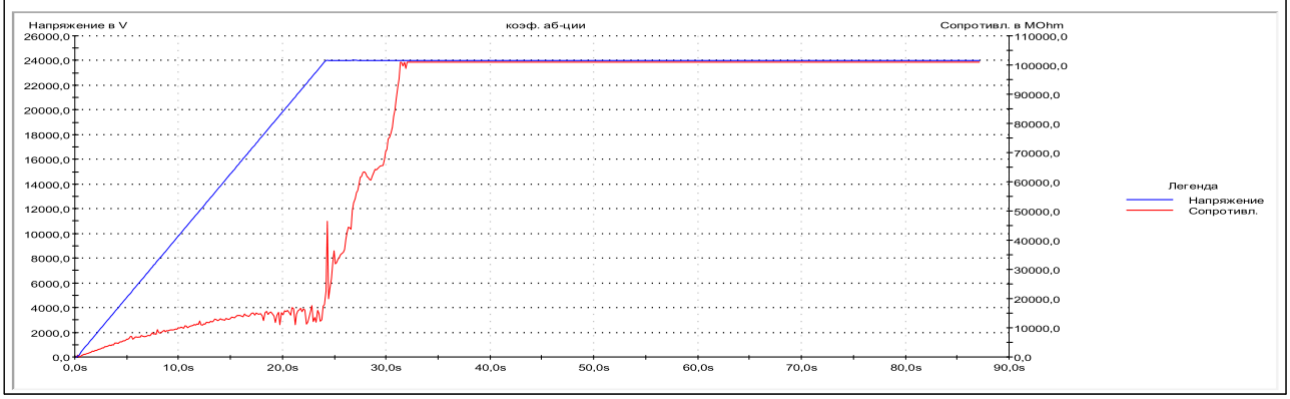


Рис. 11. График измерения коэффициента абсорбции при изолировке до формовки

Таблица 2

№ п/п	*U* исп, В	Время, с	Результат
1	21 500	60	Пройдено
2	21 500	60	Пройдено

Таблица 3

№ п/п	*U* исп/вит	Время, с	Результат
1	1200	30	Пройдено
2	1200	30	Пройдено

Таблица 4

№ п/п	*U* исп, В	Время, с	Результат
	21 500	60	Пройдено
	21 500	60	Пройдено

Результаты испытаний междувитковой изоляции постоянным током для выборки из двух катушек приведены в табл. 3.

Графики импульсного теста, проведенного для двух катушек, произведенных с изолировкой до формовки, совпадают со незначительными отклонениями 1,9 % EAR (разность площадей построенных графиков), что свидетельсвует о успешном прохождении испытания.

Испытание корпусной изоляции повышенным напряжением переменного тока в пазовых частях, АИД-70М.

Выборка: 100 %.

Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Сравнение графиков междувитковых испытаний секции, изготовленной по технологии с изолировкой после формовки и по технологии Flat-coil. Представим графики импульсного теста на рис. 12.

Графики импульсного теста, проведенного для двух катушек, произведенных по двум разным технологиям изготовления, совпадают со незначительными отклонениями в 3,4 % EAR (разность площадей построенных графиков), что означает – катушки, изготовленные по разным технологиям, имеют практическую одинаковую электрическую прочность.

Выводы

Катушки, изготовленные по технологии Flat-coil и при изолировке после формовки, прошли корпусные испытания. Междувитковые испытания показали, что EAR при изолировке после формовки равно 1,8 %; при изготовлении секций по технологии Flat-coil равно 1,9 %. Важно, что оба значения меньше максимально допустимого равного 5 %. Графики получились ровными, наличие резких скачков и перепадов свидетельствовало бы о витковом пробое проводниковой изоляции, междувитковые испытания также можно считать пройденными.

Метод изолировки после формовки предпочтительно использовать при изготовлении секций из жесткого провода с применением укрепительных стяжек, на машинах, где используется дополнительная витковая изоляция с применением сухих изолировочных лент.

Технологический процесс изготовления одной секции с применением изолировки после формовки занял в среднем на 55 минут больше времени, также было потрачено больше материала на защитную изоляцию, чем при технологии Flat-coil. Столь высокие затраты времени связаны с наличием дополнительных операций, соответствующих пунктам 2, 5 технологического процесса, из-

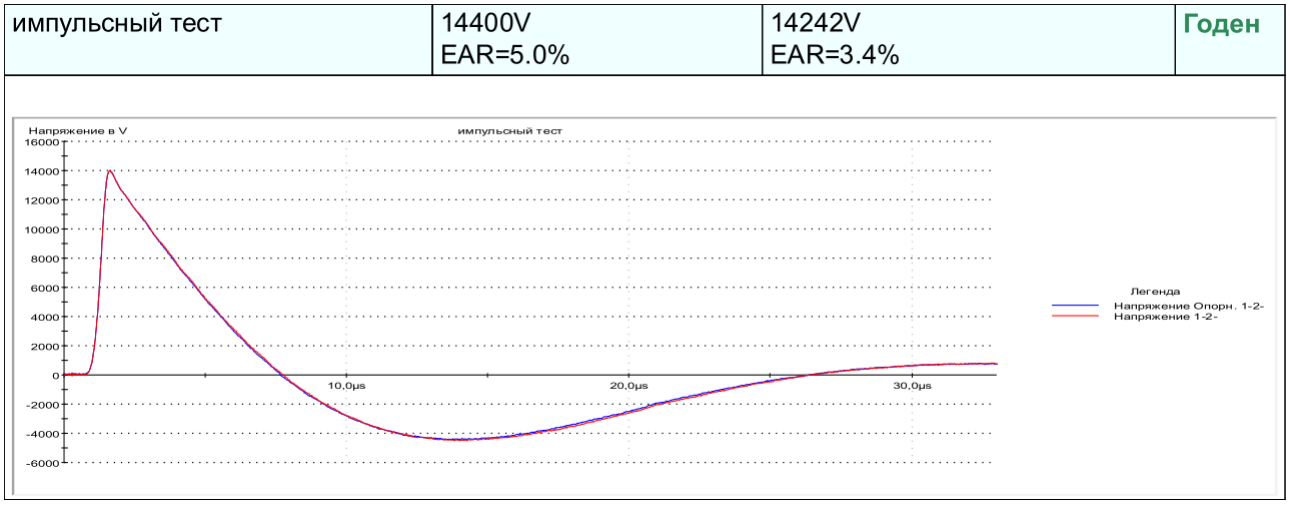


Рис. 12. График импульсного теста междувитковой изоляции

ложенного выше, немало времени также занимает нанесение изоляции вручную.

Изготовление продукции по технологии Flatcoil окажется наиболее эффективным, если при производстве использовать пропитанные ленты на катушках с высотой столбика лобовой части меньше 40 мм (это позволит избежать провалов изоляции на лобовых частях). Целесообразно использовать данный метод при изготовлении катушек со сложной геометрией из мягкого провода, который при незначительном механическом воздействии теряет заданную на формовке форму. В этом случае мы получим катушки высокого качества, затратив значительно меньшее количество времени и ресурсов.

Библиографический список

1. ГОСТ IEC/TS 60034-18-41-2014. Машины электрические вращающиеся. Квалификационные и типовые испытания для систем электроизоляции типа I, используемых во вращающихся электрических машинах с питанием от преобразователей источника напряжения. М.: Стандартинформ, 2015. 88 с.

2. ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. М.: ИПК стандартов, 2004. 35 с.

3. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев. М.: Юрайт, 2011. 767 с.

4. ГОСТ Р 8.820-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение. М.: Стандартинформ, 2019. 11 с.

УДК 620. 9

О. Я. Солёная*
кандидат технических наук, доцент
И. О. Саксонов*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ С НАЛИЧИЕМ УСТРОЙСТВ МИКРОГЕНЕРАЦИИ

Проведен анализ нормативной базы по микрогенерации в России. Исследованы технические особенности подключения микрогенераторов к сети. Обозначены тенденции развития возобновляемой энергетики в РФ.
Ключевые слова: *возобновляемые источники энергии, микрогенерация, электростанция.*

O. Y. Solenaya*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
I. O. Saksonov*
Postgraduate Student
**St. Peterburg State University of Aerospace Instrumentation*

ANALYSIS OF THE FEATURES OF THE FUNCTIONING OF OBJECTS WITH THE PRESENCE OF MICROGENERATION DEVICES

The analysis of the regulatory framework for microgeneration in Russia was carried out. The technical features of connecting microgenerators to the network are investigated. Trends in the development of renewable energy in the Russian Federation are outlined.
Keywords: *renewable energy sources, microgeneration, power plant.*

Актуальность

Согласно закону о микрогенерации в России [1] начиная с марта 2021 года и физические, и юридические лица имеют право продавать и получать выгоду от генерации энергии, полученной путем эксплуатации систем электроснабжения с наличием устройств микрогенерации. В данной области энергетики важно учитывать все особенности накопления, распределения и продажи электрической энергии в электроэнергетическую сеть с точки зрения действующих законов и стандартов.

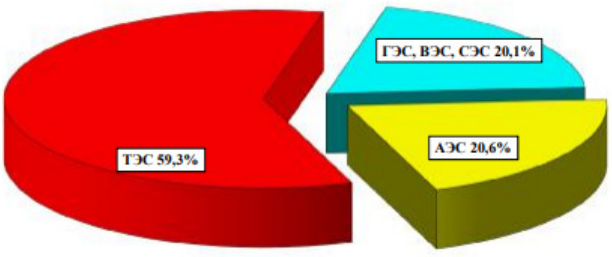


Рис. 1. Структура выработки электроэнергии по типам электростанций ЕЭС России в 2020 году

В современной России возобновляемые источники энергии (ВИЭ) являются одним из самых мало использованных отраслей добычи энергии. Это связано с тем, что наша страна имеет огромные запасы природных ископаемых, с помощью которых можно вырабатывать электроэнергию. По данным статистики единой энергетической системы (ЕЭС) в 2020 году доля выработки электроэнергии от тепловых электростанций (ТЭС) составила 620 565,1 млн кВт·ч; гидроэлектростанций (ГЭС) – 207 416,3 млн кВт·ч, атомных электростанций (АЭС) – 215 682,1 млн кВт·ч, ветроэлектростанций (ВЭС) – 1384,1 млн кВт·ч, солнечных электростанций (СЭС) – 1982,3 млн кВт·ч [2]. По этим значениям видно, что в структуре ВИЭ большую часть занимают ГЭС и лишь небольшая доля остается на ВЭС и СЭС. Следовательно, можно наблюдать, что без учета ГЭС ВИЭ вырабатывают 0,2 % от общей доли выработки (рис. 1).

Микрогенерация

Объект микрогенерации – система производства электрической энергии, принадлежащая по

праву собственности или ином законном основании потребителю электрической энергии, энергопринимающие устройства которого технологически присоединены к объектам электросетевого хозяйства с уровнем напряжения до 1000 В. При этом функционирование такого объекта возможно на основе использования ВИЭ. Потребитель производит электрическую энергию в целях удовлетворения собственных бытовых и производственных нужд, а также с целью продажи в порядке, установленном положениями функционирования розничных рынков. Объем выдачи электроэнергии таким объектом в электрическую сеть не должен превышать величины максимальной присоединенной мощности энергопринимающих устройств указанного потребителя в 15 кВт и при этом не должно использоваться электрическое оборудование, предназначенное для обслуживания более одного помещения в здании, в том числе входящее в состав общего имущества многоквартирного дома [3].

Анализ нормативной базы по микрогенерации

На сегодняшний день существуют следующие нормативные документы, регламентирующие деятельность объектов с наличием устройств микрогенерации:

- Федеральный закон от 27 декабря 2019 года № 471-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике» в части развития микрогенерации»;
- Постановление Правительства РФ от 2 марта 2021 года № 299 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации в части определения особенностей правового регулирования отношений по функционированию объектов микрогенерации» [3].

Согласно данным документам со 2 марта 2021 года каждый гражданин Российской Федерации в праве продавать электрическую энергию в сеть и получать различные субсидии.

Тенденции развития возобновляемой энергетики в России

Мировая тенденция систем на основе ВИЭ показывает существенный подъем. Российская энергетика не отстает от данного тренда и также планомерно движется в сторону перехода к «зеленой» энергетике (рис. 2).

За последние шесть лет в российское право было внесено множество поправок, которые позволяют устанавливать оборудование для преобразования возобновляемой энергии. По графику изменения объема выработки энергии от ВИЭ по времени однозначно можно сказать, что РФ интенсивно развивает данное направление (рис. 3) [4].

На рис. 3 видно, что в начале 2014 года производство энергии от возобновляемых источников было несущественным по сравнению с 2020 года, когда объем выработки увеличился в 90 раз. Это говорит о том, что развитие происходит экспоненциально и к 2030 году производство энергии от ВИЭ может достигать значительного уровня на рынке энергетики.

Технические особенности систем с микрогенерацией

Важной особенностью подключения объекта с наличием устройств микрогенерации к электрической сети является то, что его электрооборудование должно всегда работать на одном уровне напряжения, указанном в договоре с

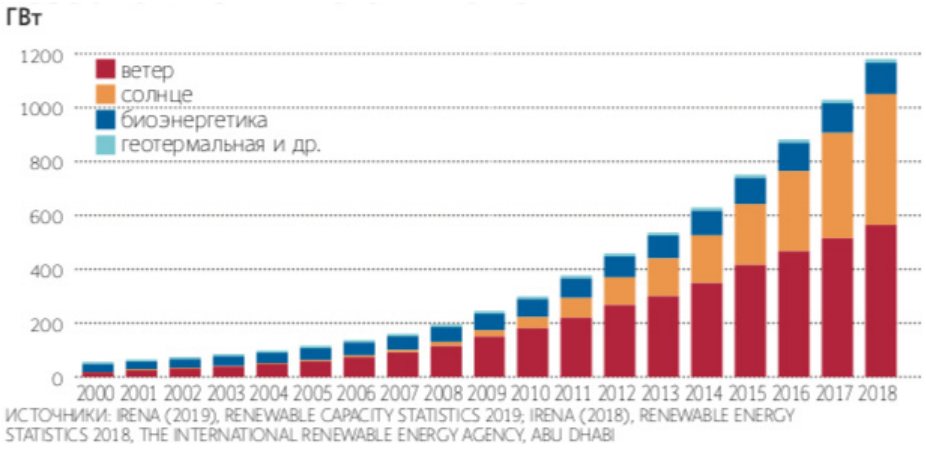
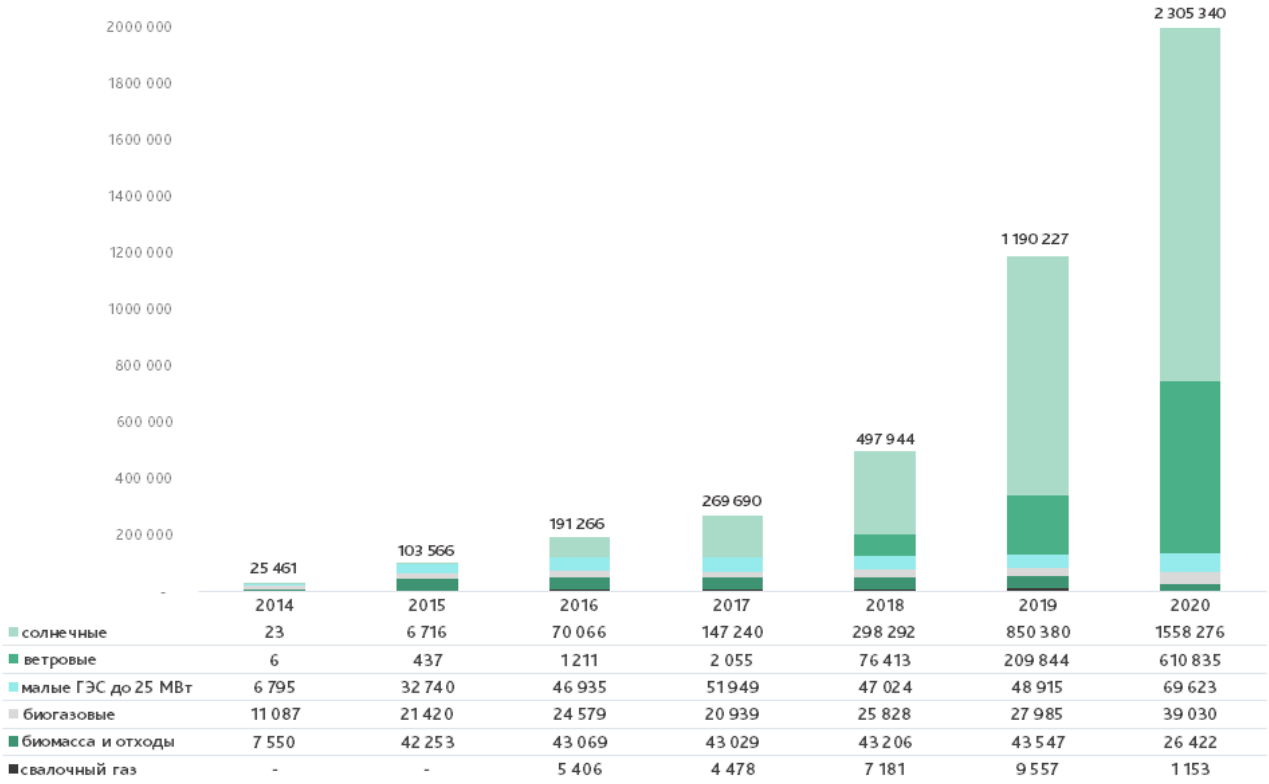


Рис. 2. Установленная мощность генерации на основе возобновляемых источников энергии в мире



	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
солнечные	23	6 716	70 066	147 240	298 292	850 380	1558 276
ветровые	6	437	1211	2 055	76 413	209 844	610 835
малые ГЭС до 25 МВт	6 795	32 740	46 935	51 949	47 024	48 915	69 623
биогазовые	11 087	21 420	24 579	20 939	25 828	27 985	39 030
биомасса и отходы	7 550	42 253	43 069	43 029	43 206	43 547	26 422
свалочный газ	-	-	5 406	4 478	7 181	9 557	1 153

Рис. 3. Объем выработки электроэнергии на объектах ВИЭ на розничном и оптовом рынке

энергосбытовой кампанией. В качестве примера рассмотрим сетевую солнечную электростанцию (СЭС) (рис. 4).

Опорным сигналом для СЭС является основной источник электроэнергии. СЭС всегда работает с ним параллельно, поскольку сетевой инвертор может добавлять во внутреннюю сеть энергию Солнца посредством синхронизации с опорным напряжением, что ведет к уменьшению потребления энергии от основного источника. Если солнечная энергия обуславливает питание от СЭС на всей территории, то потребление от основного источника сводится к минимуму.

Если на территории разрешена отдача электроэнергии сетевой компанией, что позволяет сделать закон о микрогенерации, то, согласно настройкам инвертора, имеется возможность отдавать излишки энергии в общую сеть. При этом обязательно необходимо учитывать допустимые потери напряжения в электрической сети. Согласно правилам устройства электроустановок у каждого типа сети есть свой предел отклонения напряжения:

– силовые сети –5%;

– электрическое освещение общественных зданий и промышленных предприятий – от 5 до 2,5 %;

– электрическое освещение жилых зданий, а также внешнее освещение –5% [5].

В качестве электрооборудования по принятому закону о микрогенерации потребитель имеет право вырабатывать электроэнергию с помощью возобновляемых источников энергии, используя ветрогенераторы, солнечные панели, малые гидроэлектростанции, а также невозобновляемых источников – генераторов, работающих на бензине, угле или газе.

Общемировое развитие ВИЭ

В мире большинство развитых стран интенсивно переходят на ВИЭ. В частности, в некоторых странах Европы доля ВИЭ составляет более 50 % от всей энергетики. На сайте Energy-Charts на примере Германии показано, как изменилась в процентном соотношении выработка электроэнергии с 2010 по 2020 год (рис. 5, 6) [6].

На данных графиках видно, что в течение 10 лет выработка электроэнергии от ВИЭ выросла с 19,1 до 50,3 %. Это говорит о том, что Германия сделала огромный рывок в развитии ВИЭ и увеличила их в больше, чем в два раза.

Важным аспектом перехода стран на ВИЭ является то, каким образом с точки зрения права обеспечена трансформация. В зависимости от уровня жизни используются различные модели поддержки развития возобновляемой энергети-

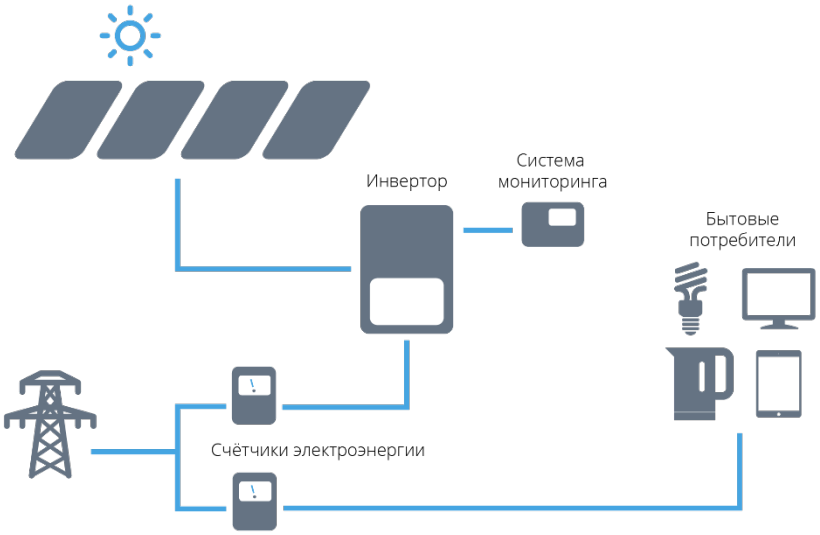


Рис. 4. Система микрогенерации солнечной электростанции с подключением к электрической сети

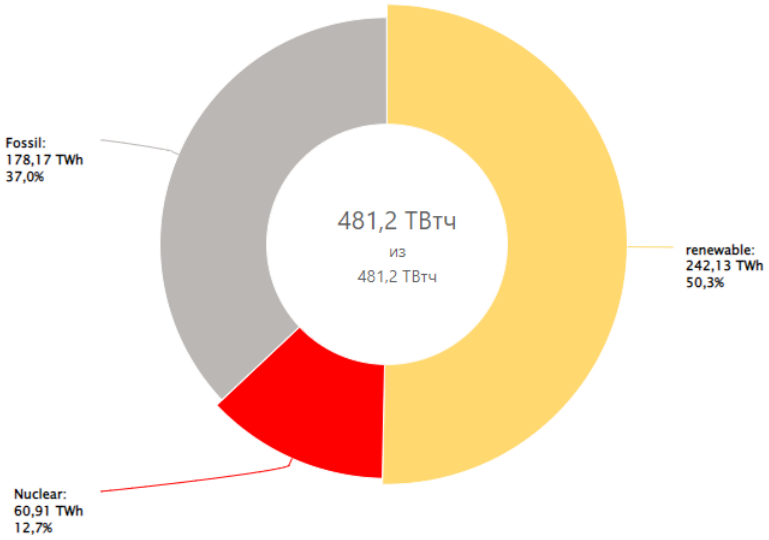


Рис. 5. Структура выработки электроэнергии по типам электростанций в Германии в 2020 году (общий)

ки. В России поддержку осуществляют посредством бюджетного финансирования, уменьшения или отсутствия налога на добычу электроэнергии с помощью ВИЭ. В иных странах используют различные положения регулятивной политики, в частности, льготные тарифы, систему «чистого измерения», портфельные стандарты, зеленые сертификаты и др [7]. Также зачастую используют различную финансовую поддержку в виде налоговых вычетов, дотаций и субсидий.

Одной из важных проблем развития технологического прогресса в данной отрасли является переработка всех компонентов устройств возобновляемых источников. Прогресс не стоит на месте и необходимо понимать, что для большего объема производства энергии на основе ВИЭ нужно совершенствовать процесс их эксплуатации и утилизации, так как данный сегмент рынка обладает вредными веществами. В частности, в состав полупроводниковых материалов входят свинец, кадмий, никель и цинк, которые являются опасными веществами в виде отходов и загрязняют экологию. Поэтому в современных реалиях России также необходима разработка законов об утилизации элементов систем, работающих на основе ВИЭ.

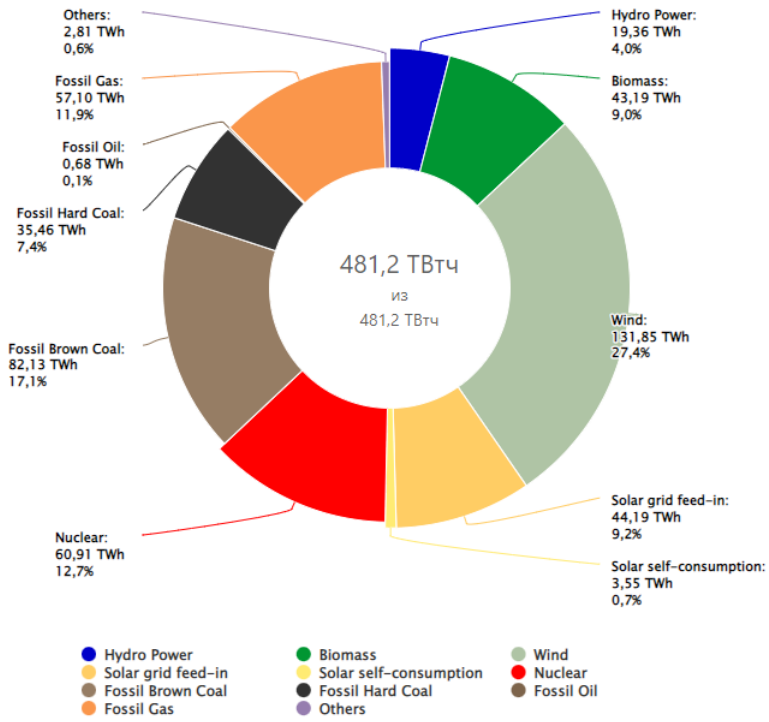


Рис. 6. Структура выработки электроэнергии по типам электростанций в Германии в 2020 году (подробный)

Заключение

На сегодняшний день в РФ развиваются законопроекты, которые способствуют развитию ВИЭ, и у потребителей электрической сети есть возможность выступить полноценным участником рынка электроэнергии, полученной с помощью систем микрогенерации, расположенных на территории потребителей. Перед массовым производством систем на основе ВИЭ необходимо наладить производство их утилизации посредством введения новых механизмов поддержки, которые смогут субсидировать данную отрасль переработки отходов.

Библиографический список

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». 26.04.2003 № 13, ст. 1177.

2. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2020 году. URL: https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2021/ups_rep2020.pdf (дата обращения: 20.12.2021).

3. Постановление Правительства РФ от 2 марта 2021 года № 299 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации в части определения особенностей правового регулирования отношений по функционированию объектов микрогенерации» // Собрание законодательства Российской Федерации. 2004. № 4, ст. 282.

4. Янтарь энергосбыт: Порядок, особенности заключения и исполнения договора купли-продажи электрической энергии, производимой на объектах микрогенерации. URL: https://yantarenergosbyt.ru/organizatsiyam/info/poryadok-osobennosti-zaklyucheniya-i-ispolneniya-dogovra-kupli-prodazhi-elektricheskoy-energii-proiz/ (дата обращения: 21.12.2021).

5. Правила устройства электроустановок. М.: Проспект, 2021. 500 с.

6. Energy-Charts: Круговые диаграммы по производству электроэнергии. URL: https://www.energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=en&c=DE&interval=year&year=2020&show_labels=1&source=public (дата обращения: 20.12.2021).

7. Cyberleninka: Научная электронная библиотека. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-gosudarstvennoy-podderzhki-i-stimulirovaniya-razvitiya-vozobnovlyaemoy-energetiki-zarubezhnyy-opyt (дата обращения: 28.12.2021).

УДК: 621.313 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-207-210**

М. В. Сержантова*
кандидат технических наук, доцент
Д. К. Лебедев*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДЫ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА MATLAB

Обучение бакалавров и магистров по специальности 13.04.02 «Энергетика и электротехника» включает дисциплину «Автоматизация расчета и проектирования электромеханических устройств. Курс представляет собой теоретическую и практическую часть. Обучение практической части по проектированию двигателей различных видов базируется на фундаментальном труде учебника «Проектирование электрических машин» И. П. Копылова. С одной стороны, в учебнике имеются некоторые неточности в формулах при расчетах, вызванные механической опечаткой, с другой стороны – учебник предполагает полностью ручной расчет. В этой связи в статье решена проблема автоматизации расчетов при проектировании электрических машин. Представленная методика позволяет делать точные расчеты (результаты проверки представлены) и ускорять процесс вычислений. Вниманию читателя представлен способ для определения главных размеров двигателя постоянного тока параллельного возбуждения с использованием программного пакета Matlab.
Ключевые слова: *электрические машины, двигатель постоянного тока, главные размеры, Matlab.*

M. V. Serzhantova*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
D. K. Lebedev*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

AUTOMATED METHODOLOGY OF DC MOTOR MAIN DIMENSIONS DETERMINATION OF PARALLEL EXCITATION USING MATLAB SOFTWARE PACKAGE ENVIRONMENT

Training of bachelors and masters on a speciality 13.04.02 «Power engineering and electrical engineers» includes discipline «Automation of calculation and designing of electromechanical devices». The course is a theoretical and practical part. Teaching the practical part of the design of motors of various kinds is based on the fundamental work of the textbook «Design of electrical machines» I. P. Kopylov. On the one hand there are some inaccuracies in the formulas in the calculations, caused by a mechanical typo, on the other hand - the textbook assumes a completely manual calculation. In this regard, the article solves the problem of automation of calculations in the design of electrical machines. The presented method allows to make accurate calculations (the results of verification are presented) and to speed up the process of calculations. The method for determining the main dimensions of a DC motor of parallel excitation using the software package Matlab is presented.
Keywords: *electric machines, DC motor, main dimensions, Matlab.*

Введение

В статье решается задача автоматизации расчета электрических машин на примере определения главных размеров двигателя постоянного тока параллельного возбуждения с использованием среды программного пакета Matlab, позволяющего в последующем провести моделирование объекта по заданным параметрам. Для наглядной иллюстрации методика представлена расчетом согласно техническому заданию для проектирования, сведенного в табл. 1.

На рис. 1 представлен график зависимости предполагаемого КПД от мощности машины постоянного тока.

Таблица 1

Мощность двигателя, кВт	90
Номинальная частота вращения, об/мин	1500
Высота оси вращения, мм	225

Рис. 1. Зависимость КПД и мощности машины

По представленному графику выбирается предполагаемый КПД.

Для машины мощностью 90 кВт выбираем значение КПД, равное 86 %. Данное значение используется для вычисления значения электромагитной мощности

$$P_{\text{эм}} = P_{\text{ном}} \cdot \frac{1+\eta}{2\cdot\eta} = 97.33 \text{ кВт}$$

После этого по графикам выбирается расчетный коэффициент полюсного перекрытия, радиальная высота магнитной системы, предварительная линейная нагрузка и индукцию в воздушном зазоре. Для этого необходимо вычислить внешний диаметр морпуса машины. Внешний диаметр не должен превышать высоту оси вращения машины более чем в два раза

$$D_{\text{внеш}} = 2\cdot h\cdot(8\ldots10)\cdot10^{-3} = 0.442 \text{ мм}$$

Сначала выбирается расчетный коэффициент полюсного перекрытия. Для машин с добавочными полюсами данный коэффициент находится в промежутке 0,55–0,72, для машин без добавочных полюсов из промежутка 0,6–0,85. На рис. 2 приведены зоны предельных значений коэффициента полюсного перекрытия для машин общего назначения при числе полюсов 2p≥4.

Для машины с внешним диаметром корпуса 0,442 м принимаем коэффициент полюсного перекрытия $\alpha_\delta = 0.67$.

В зависимости от числа пар полюсов по графику, представленному на рис. 3, выбирается относительная радиальная высота магнитной системы.

Для машины с двумя парами полюсов принимаем радиальную высоту магнитной системы $\mu = 0.5$.

Линейная нагрузка выбирается по графику, представленному на рис. 4, в зависимости от диаметра якоря и серии машины. Диаметр якоря машины рассчитывается по формуле:

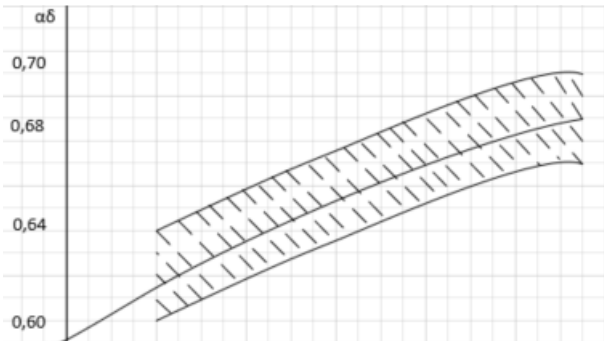


Рис. 2. Зависимость коэффициента полюсного перекрытия от диаметра машины

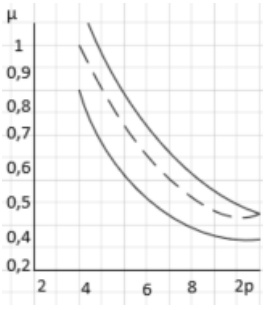


Рис. 3. Зависимость радиальной высоты магнитной системы от числа пар полюсов

$$D = \frac{D_{\text{внеш}}}{1+\mu} = 0.295 \text{ мм}$$

Для машины с диаметром якоря 0,295 м принимаем значение предварительной линейной нагрузки $A = 320\frac{A}{\text{см}}$.

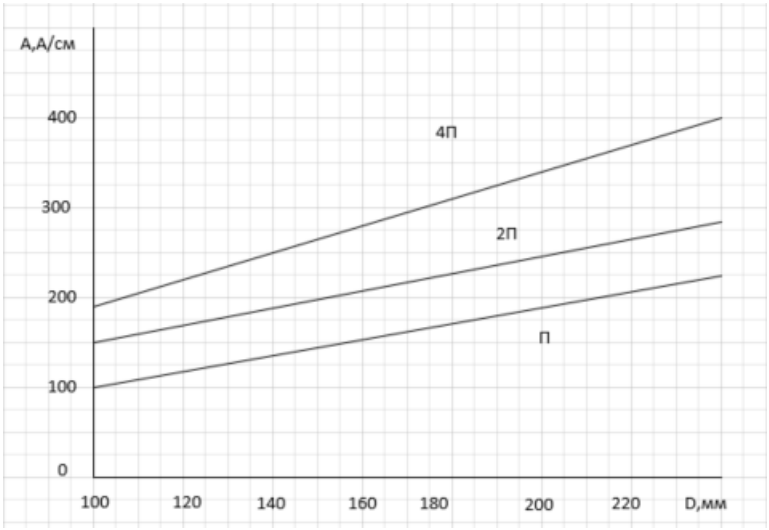


Рис. 4. Зависимость линейной нагрузки от диаметра якоря

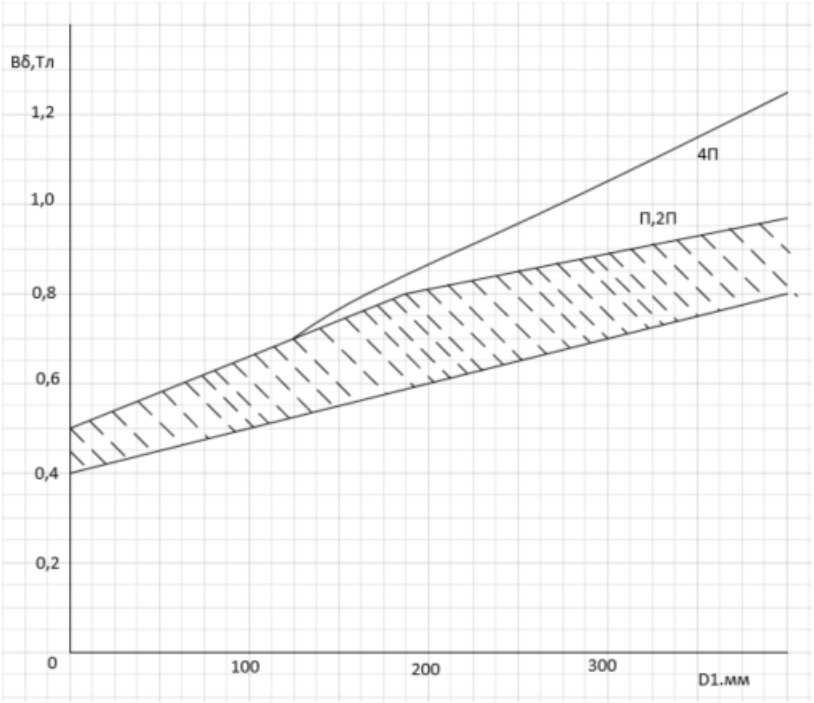


Рис. 5. Зависимость индукции в воздушном зазоре от диаметра якоря

Индукция в воздушном зазоре выбирается по графику, представленному на рис. 5.

Для машины с диаметром якоря 0,295 м принимаем значение индукции в воздушном зазоре $B_\delta = 0.8$ Тл.

Все перечисленные выше величины используются для определения расчетной длины якоря

$$l_{\text{рас}} = \frac{P_{\text{эм}}}{\alpha_\delta \cdot AA \cdot B_\delta \cdot D^2 \cdot \pi^2 \cdot n_{\text{ном}}} = 0.265 \text{ м}.$$

Выбранные величины проверяются величиной λ, отношением расчетной длины якоря к его диаметру

$$\lambda = \frac{l_{\text{рас}}}{D} = 0.899.$$

Полученное отношение должно совпадать с показаниями графика зависимости отношения λ к диаметру якоря с учетом серии машины. График представлен на рис. 6.

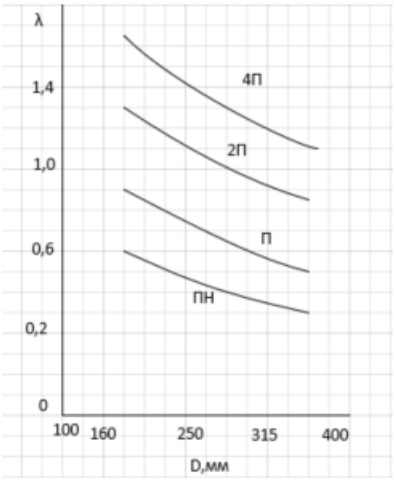


Рис. 6. Зависимость λ от диаметра якоря для машин различных серий

Как видно по графику, для машин серии 2П с диаметром якоря 0,295 м отношение расчетной длины якоря к его диаметру составляет примерно 0,9. Соответственно, выбиравшиеся по графикам величины были выбраны верно [1].

Определение главных размеров электрической машины в среде Mathlab

```
clear
clc
Pnom=90 000; %номинальная мощность, Вт %
Unom=440; %номинальное напряжение, В %
nnom=25; %номинальная частота вращения, об./с %
h=0,225; %высота оси вращения, мм %
kpd=0,86; %КПД %
mu=0,5; %
AApredv=32 000; %предварительное значение линейной нагрузки %
B=0,8; %индукция в воздушном зазоре, Тл %
alfa=0,67; %коэффициент полюсного перекрытия %
Pem=Pnom*((1+kpd)/(2*kpd)) %электромагнитная мощность %
Dvn=2*h-8*10. ^-3 %внешний диаметр машины %
D=Dvn/(1+mu) %диаметр якоря %
l=Pem/(alfa*AApredv*B*D*D*pi*pi*nnom) %расчетная длина якоря %
lambda=l/D %отношение длины якоря к диаметру %

Результаты:
Pem=
9.7326e+04
Dvn=
0.4420
D=
0.2947
l=
0.2649
lambda=
0.8988
>>
```

[2]

Заключение

Отметим, что ценность инженера состоит, с одной стороны, в накопленном опыте расчетов, а с другой – в творческом подходе для нахождения оптимального решения для поставленной задачи. Результаты, полученные с помощью в автоматизированном режиме расчета, совпадают со значениями при ручном расчете. Отметим, что программный пакет Matlab является альтернативным вариантом для проведения расчета машины постоянного тока и значительно сокращает временные затраты на вычислительные работы.

Библиографический список

1. *Копылов И. П., Клоков Б. К., Морозкин В. П.* Проектирование электрических машин: учебник для вузов / Под ред. И. П. Копылова. 4-е изд., исправ. и доп. М.: Высшая школа, 2005. 767 с.

2. Основы работы в среде Matlab: URL: https://exponenta.ru/mathworks (дата обращения: 05.01. 2022).

УДК 531.1:617-7

М. В. Сержантова*
кандидат технических наук, доцент
А. А. Приходский*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РОБОТИЗИРОВАННЫЕ МЕХАНОТЕРАПЕВТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ ВЕРХНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

Роботизированное реабилитационное оборудование, использующее продолжительную пассивную разработку суставов, полезно для пациентов с посттравматическими расстройствами, которые не могут двигаться автономно. Оно успешно заменяет работу кинезиотерапевта и обеспечивает комфорт пациента. Продолжительная пассивная разработка заключается в применении медленного и непрерывного движения к травмированным суставам. В данной статье представлен анализ современного состояния оборудования для реабилитации локтевого сустава на основе данной методики.
Ключевые слова: *принципиальная схема, роботизированная механотерапия, электропривод, продолжительная пассивная разработка (CPM), реабилитационное оборудование, локтевой сустав.*

M. V. Serzhantova*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. A. Prihodskiy*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ROBOTIC MECHANOTHERAPY DEVICES FOR ELBOW REHABILITATION

Robotic rehabilitation equipment using continuous passive motion is useful in the case of patients with posttraumatic disorders that cannot move autonomously, succeeding in both replacing the kinesiotherapist's work and increasing patient comfort. Continuous passive motion consists in applying a slow and uninterrupted movement to injured joints. This paper presents an analysis of the current stage of the elbow rehabilitation equipment developed by the authors, based on this technique.
Keywords: *circuit diagram, robotic mechanotherapy, electric drive, continuous passive motion (CPM), rehabilitation equipment, elbow joint.*

Введение

После операции подвижность оперированного сустава снижается, что может даже вызвать хроническую боль. Клинически продемонстрировано, что иммобилизация (фиксация) после операции на суставах увеличивает время восстановления и замедляет процесс заживления, способствуя развитию спаек и рубцовых тканей, что может привести к долгосрочным или постоянным ограничениям движений [1], [12].

Пассивная кинезиотерапия предназначена для пациентов, у которых отсутствуют необходимые биологические ресурсы для управления движением [2]. Вышеупомянутые проблемы могут быть решены с помощью непрерывного пассивного движения (CPM), терапевтической процедуры, состоящей в применении ряда движений к пораженному суставу без самостоятельного напряжения мышц пациента. CPM может быть достигнуто с помощью кинезиотерапии или специально разработанного оборудования.

Известно, что отсутствие движений сказывается и на мышцах, которые в результате иммобилизации атрофируются. На рис. 1 показано сравнение нормальной мышцы и атрофированной. В случае атрофированной мышцы можно заметить уменьшение размера, силы и подвижности.

Хотя естественное восстановление подвижности может занять несколько месяцев, использование непрерывных пассивных движений не только ускоряет заживление, но и предотвращает образование рубцовой ткани и снижает жесткость суставов.

Локтевой сустав состоит из трех костей: плечевой, локтевой и лучевой (рис. 2). Можно считать, что в свою очередь соединив две из этих трех костей, образуются три сустава (плечевой, плечевой и лучевой, и лучелоктевой). Однако из-за существования единой капсулы, выстлан-

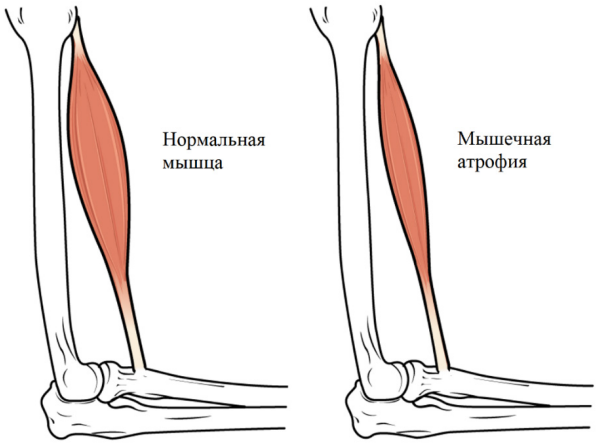


Рис. 1. Влияние атрофии на мышцы

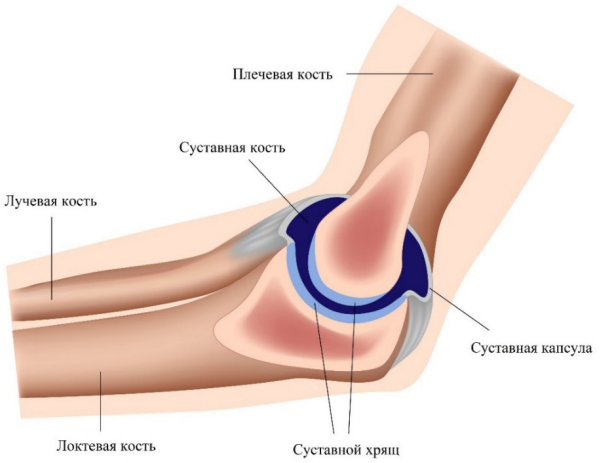


Рис. 2. Локтевой сустав

ной единственной синовиальной оболочкой, некоторые авторы утверждают, что образуется единый сустав [3], [27].

Физиологически локоть выполняет два движения: сгибание-разгибание и пронация (вращение внутрь) – супинация (вращение наружу). Следовательно, локоть имеет два сустава: плечевой сустав для движения сгибания-разгибания и лучевой сустав для движения пронации-супинации.

Поскольку после операции на суставе движения не могут быть выполнены пациентом по разным причинам (суставным, мышечным), пассивное движение выполняет необходимую мобилизацию без сокращения мышц.

Таким образом, можно контролировать послеоперационную боль и уменьшить отек. Эту технику можно использовать сразу после операции с возможностью увеличения во времени амплитуды движения.

Польза оборудования при реабилитации локтевого сустава CPM

Среди причин, по которым устройство непрерывного пассивного движения предпочтительнее кинезиотерапевта при посттравматическом восстановлении, является комфорт и безопасность, обеспечиваемые таким оборудованием [4], [9].

Эти устройства были разработаны с целью заменить физическую работу кинезиотерапевта, применяя медленные, ритмичные и непрерывные движения к суставам. К преимуществам, помимо сокращенного периода восстановления, относятся также безопасное и простое использование с компьютерным управлением.

Реабилитация пациента направлена на полное восстановление сниженных или утраченных двигательных функций. Этот процесс заживления начинается в больнице сразу после операции и при необходимости продолжается дома у пациента.

Эти устройства могут использоваться как в медицинских отделениях, так и дома у пациентов, где они могут настраивать свою собственную программу реабилитации, регулируя амплитуду движения, скорость и т. д., в соответствии с программой посттравматического восстановления, рекомендованной врачом или кинезиотерапевтом.

Реабилитационные устройства могут быть моносуставными (для восстановления одного сустава) или многосуставными (для восстановления нескольких суставов).

Устройства для реабилитации с электрическим приводом

Далее будет представлен обзор текущего состояния оборудования для реабилитации локтевого сустава. В настоящее время большинство устройств приводится в действие электродвигателями, которые позволяют регулировать движение и скорость в соответствии с соответствующим планом лечения.

Otto Bock – немецкая компания с почти 100-летним опытом в производстве протезов и реабилитационного оборудования – производит следующие два устройства для реабилитации локтя [5]:

– устройство E3 Elbow CPM, показанное на рис. 3, позволяет как сгибание/разгибание, так и пронацию/супинацию;

– устройство PS1 Pronation/Supination, показанное на рис. 4, допускает только пронацию/супинацию.

Рис. 3. E3 Elbow CPM Device

Рис. 4. PS1 Pronation/Supination Device

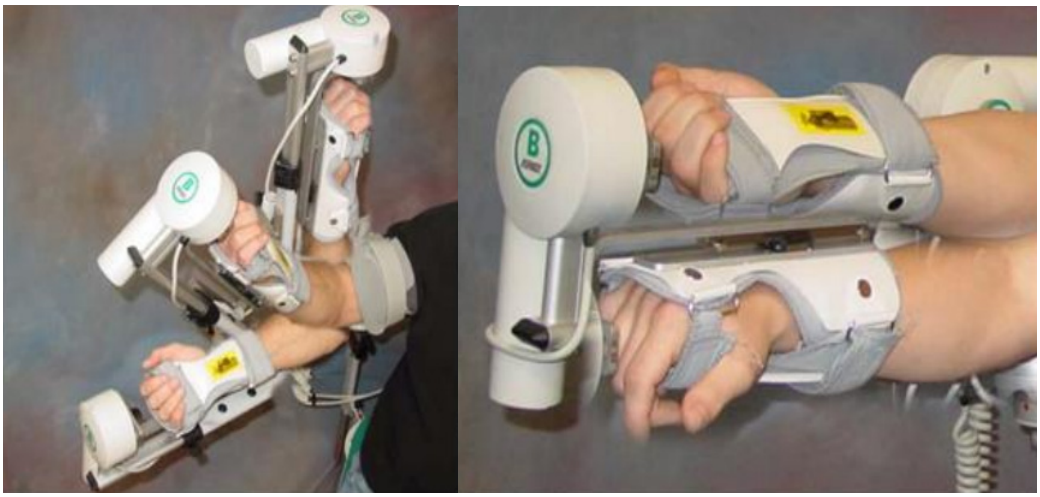


Рис. 5. CPM «Elbow KE2»

Следующее представленное реабилитационное оборудование является продуктом компании Kinex Medical, американского поставщика медицинского оборудования, специализирующегося на различных послеоперационных методах лечения (CPM, криотерапия, DVT терапия, устройства TENS, бандажи/подвесы) [6].

На рис. 5 показано устройство CPM «Elbow KE2», предназначенное для достижения сгибания/разгибания и пронации/супинации по отдельности, а не одновременно.

Французская компания Kinetec производит два устройства для реабилитации локтя:

– Kinetec 6080 Elbow CPM, представленный на рис. 6 (слева), который может выполнять два типа движений: сгибание/разгибание или сгибание/разгибание с синхронизированной пронацией/супинацией;

– локтевой модуль Kinetec Centura, представленный на рис. 6 (справа), позволяет сгибать/разгибать с фиксированной пронацией/супинацией, а также может использоваться во всех плоскостях отведения плеча (то есть отвода руки от тела) [7].

Итальянская компания RIMEC также производит два устройства для реабилитации локтя:

– Fisiotek LT-G, представленный на рис. 7, используется как для сгибания/разгибания, так и для пронации/супинации предплечья.

– Fisiotek HP2, показанный на рис. 7, с помощью специальных принадлежностей выполня-

Рис. 6. CPM «Elbow KE2» (слева) и Kinetec Centura (справа)

Рис. 7. Устройства компании RIMEC

ет движения, сгибание/разгибание и пронацию/супинацию [8].

Следующее устройство, включенное в анализ, – это Pankaj Elbow CPM, показанное на рис. 8. Светодиодная панель управления позволяет выполнять сгибание/разгибание на основе предварительно заданного диапазона движений, которые должны выполняться в течение определенного периода. Аппарат поставляется с принадлежностями как для пронации/супинации, так и для вращения запястья [9].

На рис. 9 представлен Artromot E2 Elbow CPM, оборудование, которое обеспечивает полное сгибание/разгибание и пронацию/супинацию [10].

В нашей стране в НИУ «БелГУ» было разработано и запатентовано устройство для лечения контрактур локтевого сустава. Оно относится к механотерапевтическим аппаратам для восстановления функции локтевого сустава при наличии контрактур травматического и нетравматического генеза [11].

Устройство содержит два закрепленных параллельно линейных двигателя, подключенных к программируемому электронному блоку управления с возможностью выдвижения штоков двигателей как на одинаковую длину при синхронной работе двигателей, так и на различную длину при асинхронной работе линейных двигателей в автоматическом режиме.

Устройство содержит два датчика усилия, размещенные на упругих пластинах и два датчика угла поворота, шпильки которых закреплены на навесах. Благодаря им соединены предплечевой и плечевой элементы фиксации сегментов конечности. Дополнительно два датчика электромиографии жестко закреплены с внутренней стороны плечевого элемента фикса-

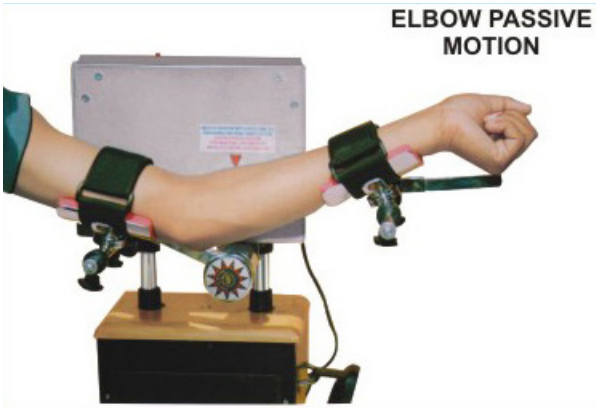


Рис. 8. Pankaj Elbow CPM

ции сегмента конечности, а два других датчика электромиографии – с внутренней стороны предплечевого элемента фиксации сегмента конечности, что обеспечивает измерение электрической активности мышц, задействованных при проведении механотерапии.

Техническое достижение заключается в возможности проведения мониторинга и сбора информации об электрической активности мышц плеча и предплечья при проведении механотерапии, что позволяет выявить положительную или отрицательную динамику данной процедуры и проводить соответствующую корректировку режимов работы устройства для обеспечения индивидуального подхода при проведении механотерапии.

Устройства реабилитации с пневматическим приводом

Рис. 9. Устройство Artromot E2 Elbow CPM

Другая категория реабилитационного оборудования касается устройств с пневматическим приводом, в которых сила и движение производятся сжатым воздухом. Сжатый воздух – это ресурс, который используется во многих областях, в том числе в промышленности, для пневматических приводных систем. В последнее время эти системы все чаще используются из-за их специфических характеристик и многих преимуществ, таких как возможность безопасного интенсивного использования с частыми запусками и остановками; небольшой общий размер, благодаря широким возможностям расположения компонентов; простота производства, хранения и транспортировки сжатого воздуха; экологическая чистота и негорючесть; низкие эксплуатационные расходы на оборудование.

Пневматический мускул – один из генераторов движения, используемых в пневматических системах. Это эластичный элемент, увеличивающий свой диаметр и уменьшающий длину под

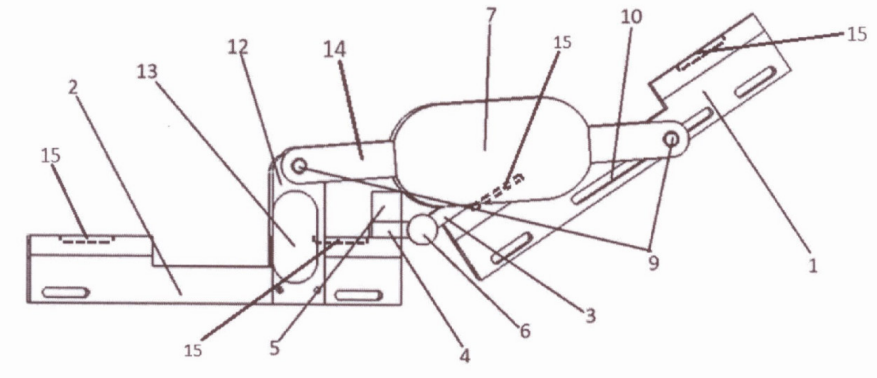


Рис. 10. Патент RU 191272 U1

давлением воздуха. Таким образом, подача сжатого воздуха позволяет перемещать груз в определенном направлении, совершая ход, прямо пропорциональный подаваемому давлению. После прекращения подачи сжатого воздуха мышца принимает первоначальную форму и размеры (рис. 11).

Если одна мышца не может выполнять желаемые движения, доступны различные решения для последовательной или параллельной установки нескольких мышц, а также использование вспомогательных элементов, таких как шкивы, как показано ниже.

Далее будут представлены несколько примеров запатентованного оборудования с пневматическим приводом мышц для реабилитации локтевого сустава.

Шанхайский университет транспорта разработал устройство для медицинской реабилитации локтевого сустава с пневматическим приводом, показанное на рис. 12. Оно включает в себя устройство фиксации верхней руки, опорное устройство предплечья, соединительный вал, пневматическую мышцу с прикрепленной резьбой и шестерню, соединенную с опорное устройство вала и предплечья с помощью ремня [12]. Таким образом, сокращение пневматической мышцы через шкив заставляет опорное устройство предплечья двигаться.

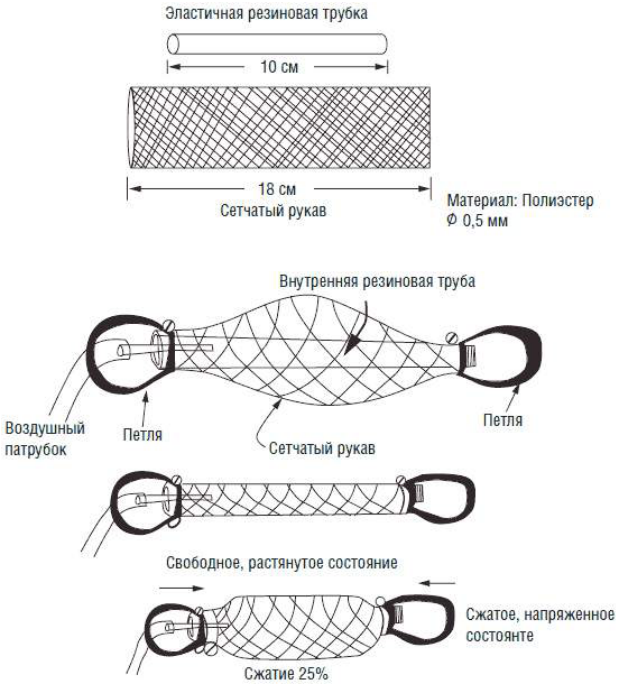


Рис. 11. Принцип работы пневматической мускулатуры

Китайский университет Цзиляна разработал пневматический сустав, приводимый в действие мускулами (рис. 13). Устройство состоит из двух соединенных стержней, вращающегося вала и общей опоры, гибкой втулки, пневматической мускулатуры, буферной системы и пружины сжатия [13]. Давление воздуха вызывает сжатие/расслабление пневматической мускулатуры, что

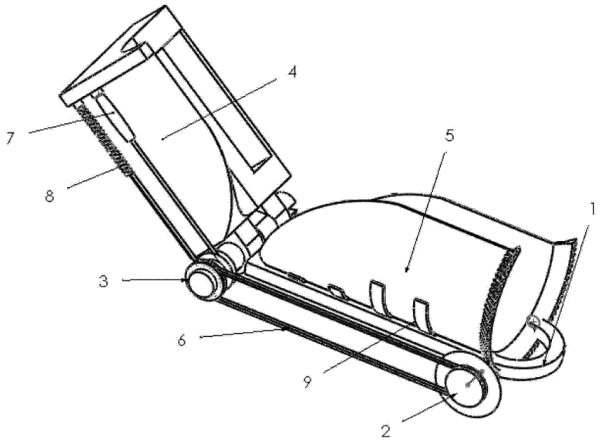


Рис. 12. Патент CN203263743U

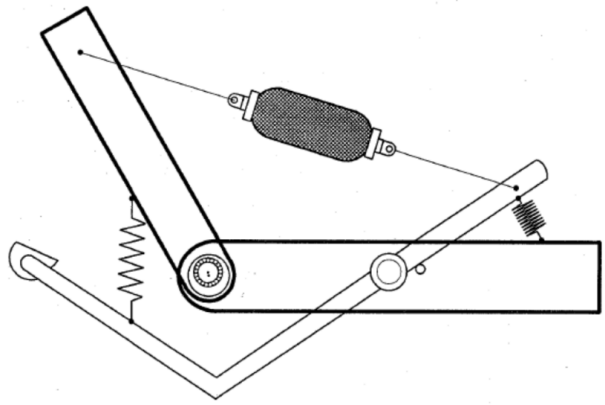


Рис. 13. Патент CN202071080

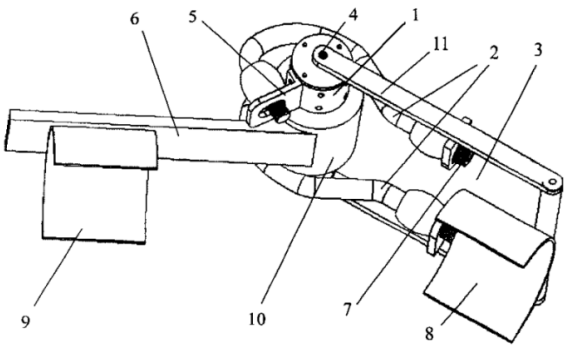


Рис. 14. Патент CN200984250

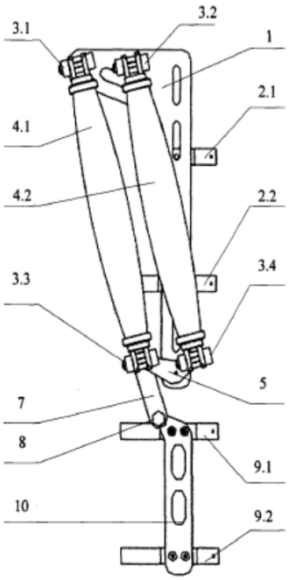


Рис. 15. Патент CN201108566

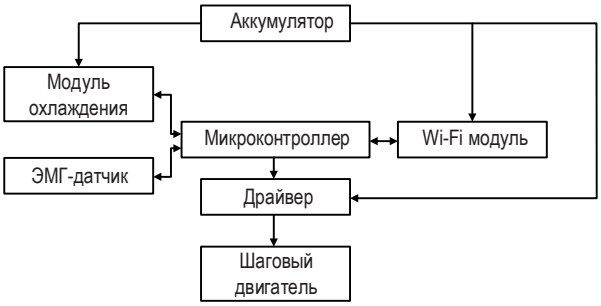


Рис. 16. Структурная схема механотерапевтического устройства

вызывает вращение левой шарнирной планки на определенный угол, допускаемый пружиной.

Чжэцзянский университет Китая разработал для реабилитации локтя устройство, приводимое в действие двумя пневматическими мышцами (рис. 14), которое выполняет вращение локтя и плеча [14]. Это движение возможно за счет управления давлением воздуха, подаваемого на две пневматические мышцы.

Следующий патент используется для имитации свободы движения локтя и для обеспечения большего рабочего пространства для сустава (рис. 15). Устройство легкое, им легко управлять и его можно носить, поэтому он оказывает непосредственную помощь травмированному суставу [15].

Устройство управляется пациентом, а сила срабатывания регулируется посредством давления, распределяемого между двумя параллельно установленными мышцами.

На основе проведенного обзора составлена принципиальная схема (рис. 16).

Выводы

Длительная иммобилизация негативно влияет на организм человека. В случае если после операции пациенты не могут двигаться автономно, рекомендуемым решением является непрерывное пассивное движение, которое обеспечивает механическую тренировку суставов без напряжения мышц.

Использование реабилитационного оборудования дает множество преимуществ. К ним относятся комфорт и безопасность, сокращение периода восстановления, возможность использования устройств как в медицинских учреждениях, так и в домах пациентов, а также успешная замена работы кинезиотерапевта.

В настоящее время большинство оборудования для реабилитации локтевого сустава имеет электрический привод. Преимущества пневматического привода, такие как простая конструкция, повышенная гибкость, меньшая стоимость, делают пневматическое оборудование подходящим для замены электрических устройств.

В исследовании представлены исследования текущего состояния проектирования оборудования для реабилитации локтевого сустава на базе CPM и его принципиальная схема. На основе этого анализа дальнейшие исследования будут сосредоточены на разработке нового решения для оборудования для реабилитации локтевого сустава.

Библиографический список

1. *Salter R.* Clinical Orthopaedics and Related Research, 12. 1989. 242 p.

2. *Albu C., Albu A.* Kinetoterapia pasivă, Romania, 2004.

3. *Гайворонский И. В., Ничипорук Г. И.* Анатомия соединения костей. 3-е изд., перераб. и доп. СПб., 2006. 48 с.

4. *Oraviţan M.* UVT Annals, EFS Serie, 2007. 39 p.

5. Otto Bock. URL: http://www.ottobock.com/ (дата обращения: 12.12.2021).

6. Kinex Medical. URL: http://www.kinexmedical.com/ (дата обращения: 12.12.2021).

7. Kinetec. URL: http://kinetec. fr/en/ (дата обращения: 12.12.2021).

8. Rimec. URL: http://www.rimec. it/ (дата обращения: 12.12.2021).

9. India Medico. URL: http://www.indiamedico.com/ (дата обращения: 12.12.2021).

10. Artromot. URL: http://www.ormed. djoglobal.eu/ (дата обращения: 12.12.2021).

11. Патент №RU191272U1. Российская Федерация, A61H 1/02 Устройство для проведения механотерапии при лечении контрактур локтевого сустава заявл. 19.03.2019, опубл. 31.07.2019 / Дубров В. А.; заявитель НИУ «БелГУ». 8 с.

12. *Liu J.* Elbow medical rehabilitation device based on pneumatic artificial muscledrive. CN203263743, 2013.

13. *Dongming Y., Binrui W., Yinglian J.* Pneumatic muscle flexible elbow joint device with buffer spring and flexible shaft sleeve. CN202071080, 2011.

14. *Canjun Y., Jiafan Z., Jie Z.* Flexible ectoskeleton elbow joint based on pneumatic power. CN200984250, 2007.

15. *Caihua X.* Elbow joint healing training device. CN201108566, 2008.

УДК 62-97/-98 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-219-225**

О. Я. Солёная*
кандидат технических наук, доцент
Н. Д. Иванов*
магистрант
Н. С. Яковлев*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САМП

В статье приводится описание системы управления и математическая модель системы активного магнитного подвеса (САМП). Приведен анализ динамических характеристик, рассмотрены конструкция, принцип работы, функциональное назначение САМП, а также внешние силовые воздействия.
Ключевые слова: *активный магнитный подвес, мехатронная система, динамические характеристики.*

O. Y. Solenaya*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
N. D. Ivanov*
Postgraduate Student
N. S. Yakovlev*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

STUDY OF THE CONTROL SYSTEM AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SAMP

The article provides a description of the control system and a mathematical model of an active magnetic suspension system (AMS). An analysis of the dynamic characteristics is given, the design, principle of operation, functional purpose of the SAMP, as well as external force effects are considered.
Keywords: *Active magnetic suspension, mechatronic system, dynamic characteristics.*

Функциональное назначение САМП

Активный магнитный подвес (АМП) предназначен для бесконтактного подвеса и центрирования роторов вращающихся машин различного назначения и парирования внешних нагрузок на ротор в режимах эксплуатации. Принцип работы АМП основан на магнитной левитации ферромагнитных тел в магнитном или электромагнитном полях, создаваемых внешними источниками. В настоящее время АМП получил стремительное распространение ввиду его явных преимуществ по сравнению с традиционными подшипниками – скольжения, качения и газодинамическими.

Конструктивно АМП состоит из двух основных частей (рис. 1): электромеханической части (магнитных подшипников) и электронной системы управления. Магнитный подвес включает в себя: ротор, статор, в пазы которого уложены обмотки электромагнитов, и датчики положения ротора. Электронная система управления содержит регуляторы и усилитель мощности. Используя информацию, поступающую с датчиков перемещения, эта система управляет положением ротора путем изменения токов в электромагнитах. Соответствующий выбор закона управления токами позволяет обеспечить устойчивое положение ротора в его центральном положении, а также получить желаемые значения жесткости и демпфирования подвеса [1].

Система активного магнитного подвеса (САМП) предназначена ддя осуществления пространственной стабилизации подвешиваемого объекта ограничения величин его смещения от некоторого равновесного положения в пределах воздушного зазора при наличии определенных внешних силовых возмущающих воздействий и обеспечение абсолютной асимптотической устойчивости его равновесного состояния при отсутствии таких воздействий. САМП, являясь мехатронной системой, включает в себя следующие функциональные элементы (рис. 1):

– *датчики положения подвешиваемого объекта* (ДП), которые формируют сигналы, однозначно определяющие положение подвешиваемого тела относительно электромагнитов активных магнитных опор (АМО);

– *датчики токов* (ДТ), которые формируют сигналы, пропорциональные токам в обмотках АМО;

– *регулятор* САМП, который обрабатывает сигналы ДП и ДТ и формирует управляющие напряжения на обмотках АМО;

– *электромагниты* АМО, которые обеспечивают создание электромагнитных сил, воздействующих на подвешиваемое тело.

Регулятор САМП в свою очередь содержит следующие элементы (рис. 2):

– *процессор*, который обрабатывает в соответствии с выбранным алгоритмом управления сигналы датчиков состояния системы (положения и токов), формирует сигналы, управляющие выходными силовыми каскадами, обеспечивает возможность настройки и корректировки алгоритма управления и контроля состояния САМП, а также информационное взаимодействие (интеграцию) с системами вышестоящего уровня, в частности, с автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУ ТП).

При этом алгоритм управления САМП обеспечивает:

– устойчивость системы в точке подвеса;

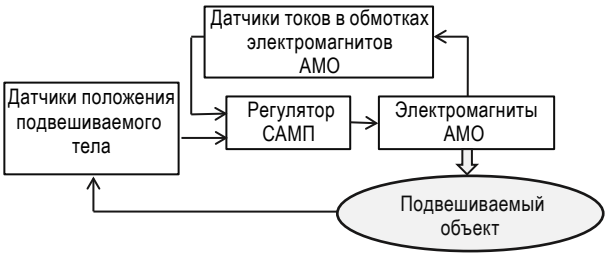


Рис. 1. Функциональная схема САМП

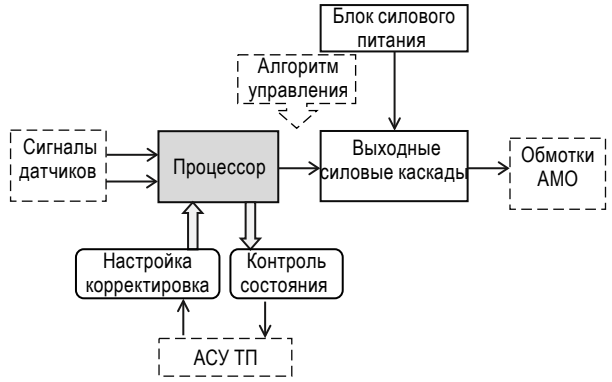


Рис. 2. Функциональная схема регулятора САМП

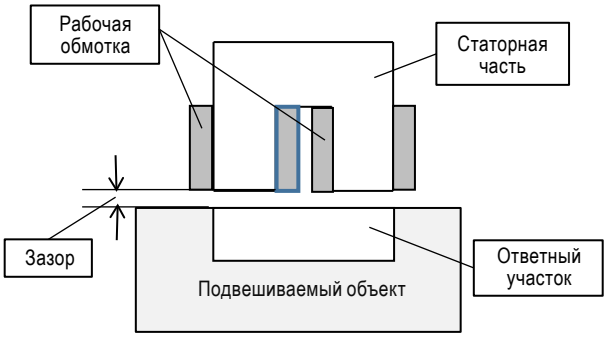


Рис. 3. Структура АМО

– отработку имеющихся внешних возмущающих воздействий в пределах допустимых смещений подвешиваемого тела;

– оптимизацию ресурсов управления по току и напряжению;

– подавление стационарных помех в диапазоне рабочих частот вращения без ухудшения показателей устойчивости в точке подвеса;

– возможность практической реализации с помощью стандартных аппаратных и программных средств.

– *выходные силовые каскады (усилители)*, формирующие в соответствии с выходными сигналами процессора широтно-импульсно модулированные (ШИМ) управляющие напряжение на обмотках АМО;

– *блок силового питания*, обеспечивающий необходимое опорное силовое напряжение на выходных силовых каскадах.

Электромагниты АМО включают в себя (рис. 3):

– *рабочие обмотки*, обеспечивающие создание требуемых величин магнитодвижущих сил (МДС), обуславливающих замкнутые магнитные потоки;

– *магнитопроводы* (ферромагнитные проводники замкнутых магнитных потоков), разделенные воздушным зазором на неподвижные статорные (корпусные) части, и ответные участки, размещенные на подвешиваемом объекте [1].

Конструкции АМП

АМО вращающегося ротора называют активными магнитными подшипниками (АМП). На практике, в основном, используются два основных типа АМП радиальные и радиально-упорные полюсные АМП и осевые дисковые АМП двухстороннего действия [1].

Чтобы создать электромагнитную силу в любом радиальном направлении, статор радиального АМП должен иметь не менее трех пар полюсов. Обычно используется 8-полюсная конструкция (четыре пары полюсов), в которой обмотки двух соседних полюсов соединяются между собой и

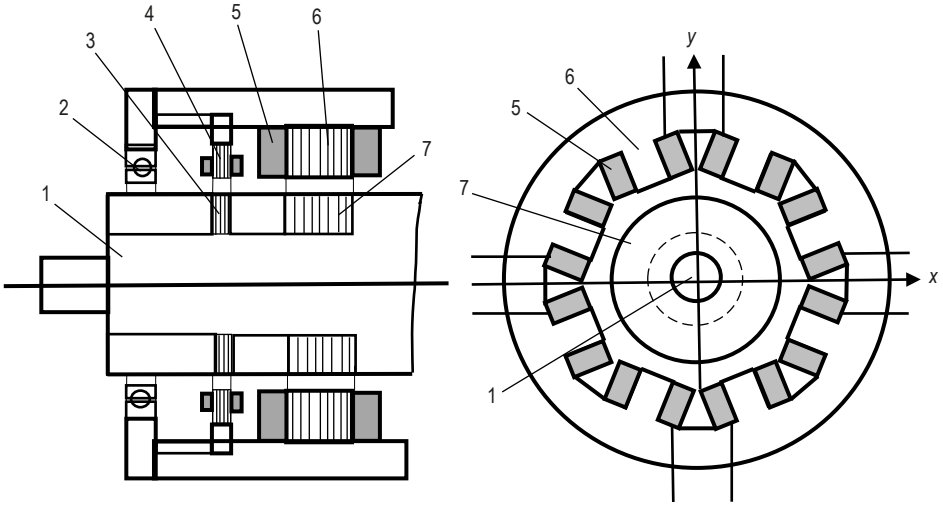


Рис. 4. Конструктивная схема радиального АМП

вместе с этими полюсами образуют электромагниты (рис. 4). В результате статор содержит четыре электромагнита: два из них удерживают цапфу 7 ротора по оси *OX*, два других – по оси *OY*. В случае больших диаметров цапфы целесообразно использовать большее число полюсов 16, 24, 32. Это позволяет уменьшить габаритные осевые размеры подшипника за счет уменьшения лобовых размеров обмоток 5. Для уменьшения потерь на магнитный гистерезис соседние полюса 6 соседних магнитов имеют одинаковую полярность [2].

Измерительная часть радиального АМП содержит датчики перемещения цапфы в радиальных направлениях *OX*, *OY*. По принципу действия датчики перемещения могут индуктивными, индукционными (вихревыми), емкостными и оптическими.

Индуктивный датчик состоит из статора 4 и укрепленного на валу 1 шихтованного измерительного кольца 3, конструкции которых аналогичны конструкциям силового статора и цапфы соответственно. Разница лишь в значительно меньшей толщине пакетов железа и большим числом полюсов и обмоток. Страховочный подшипник 2 может быть либо шарикоподшипником, либо подшипником скольжения. Он служит для двух целей: как опора ротора при отключенных АМП и для обеспечения выбега ротора кратковременно или до полной остановки в случае аварийного отказа АМП. Зазор в страховочных подшипниках обычно равен половине рабочего зазора АМП [2]. Шарикоподшипники могут закрепляться как на валу, так и в корпусе машины. Страховочный подшипник скольжения содержит вкладыши, изготовленные из графита, бронзы, фторопласта или тефлона.

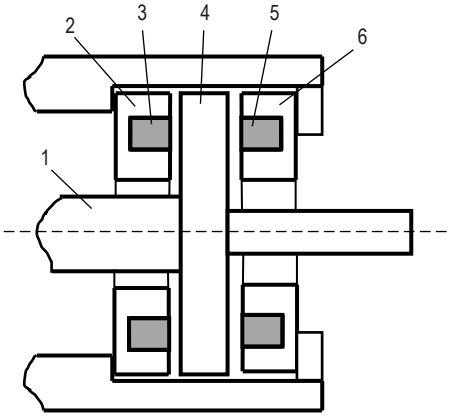


Рис. 5. Конструктивная схема осевого АМП

Радиально-упорный АМП имеет коническую расточку статора и коническую цапфу; в остальном конструкция его статора аналогична конструкции статора радиального АМП.

Осевой дисковый АМП двустороннего действия (рис. 5) содержит укрепленный на валу 1 сплошной (нешихтованный) ферромагнитный диск 4, расположенный между двумя кольцевыми электромагнитами 2 и 6 с обмотками 3 и 5. При действии на ротор значительной постоянной осевой нагрузки, например, силы тяжести, действующей на вертикально расположенный ротор, можно использовать осевой АМП одностороннего действия с одним электромагнитом.

Математическая модель САМП

Динамические процессы в САМП описываются системой дифференциальных уравнений

(ДУ), имеющих структуру уравнений Лагранжа – Максвелла 2-го рода. В самом общем случае подвеса по пяти координатам динамическая модель САМП ротора представляет собой достаточно сложную систему, включающую пять «механических» ДУ 2-го порядка и десять «электрических» ДУ первого порядка. Однако при выполнении определенных (и имеющих место во многих практических случаях) условий для анализа динамических процессов САМП, в том числе и для синтеза регулятора, могут быть эффективно использованы существенно более простые однокоординатные динамические модели САМП [3]. К таким условиям, в частности, относятся:

– малость гироскопических моментов вращающегося ротора по сравнению с моментами электромагнитных сил, создаваемых АМО;

– малость взаимных индуктивностей рабочих обмоток АМО по сравнению с их собственными индуктивностями;

– наличие инерционной симметрии ротора относительно осей силового воздействия АМП.

Математическая модель динамических процессов САМП по одной координате представляет собой следующую систему нелинейных ДУ [3].

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial W(I_1,I_2;x)}{\partial I_1}\right)=U_{1S}-\dfrac{\partial P(I_1,I_2)}{\partial I_1} \\ \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial W(I_1,I_2;x)}{\partial I_2}\right)=U_{2S}-\dfrac{\partial P(I_1,I_2)}{\partial I_2} \\ \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial T(\dot{x})}{\partial \dot{x}}\right)=\dfrac{\partial W(I_1,I_2;x)}{\partial x}+F(t) \end{cases}$$

Здесь: x [м], $\dot{x}=dx/dt$ [м/с] – величина и скорость смещения подвешиваемого объекта относительно центрального положения (точки подвеса);

I_1, I_2 [А] – токи в верхней и нижней (правой и левой или передней и задней) обмотках АМП (рис. 4, 5);

$W(I_1, I_2; x)$ [Дж] – магнитная энергия обмоток АМП

$$W(I_1,I_2;x)=\frac{1}{2}\cdot L_1(x)\cdot I_1^2+\frac{1}{2}\cdot L_2(x)\cdot I_2^2.$$

$L_1(x)$, $L_2(x)$ [Гн] собственные индуктивности верхней и нижней (правой и левой или передней и задней) обмоток АМП.

Состав переменных, описывающих состояние системы

В соответствии с теорией электромеханических систем текущее состояние системы активного магнитного подвеса однозначно определяется совокупностью механических и электрических обобщенных координат, а также их производных. При выборе механических переменных (механических обобщенных координат), описывающих состояние САМП в плане пространственного положения подвешиваемого объекта, существенное значение имеет понимание (наличие предположений) о механических свойствах данного объекта. В одних случаях его можно рассматривать как абсолютно твердое тело, в других – в качестве упругой системы с распределенными параметрами. Отметим, что при разработке САМП этот вопрос является весьма принципиальным, ввиду необходимости учитывать возможность возникновения упругих (изгибных) колебаний подвешиваемого объекта, заметно ухудшающих динамические свойства системы или даже (для высокооборотных роторов) приводящих к потере устойчивости подвеса при достижении соответствующей (критической) частоты их вращения [4].

Предполагаем, что подвешиваемый объект представляет собой абсолютно твердое тело, что отвечает большинству практических случаев. Введем в рассмотрение две трехмерные прямоугольные (декартовы) системы координатных осей – неподвижную $OXYZ$, и подвижную $O'X'Y'Z'$ центр которой ($\bullet O'$) жестко связан с центром масс (ЦМ), а ориентация координатных осей такова, что $O'X' \uparrow\uparrow OX$, $O'Y' \uparrow\uparrow OY$, $O'Z' \uparrow\uparrow OZ$ (рис. 6).

Обобщенные координаты – переменные состояния, описывающие конфигурацию динамической системы относительно некоторой эталонной конфигурации.

Абсолютно твердое тело – механическая система с определенными инерционными характеристиками (массой и моментами инерции), обладающая только поступательными и вращательными степенями свободы. Пространственное положение подвешиваемого объекта в данных системе координат определяется смещениями ЦМ ($\bullet O'$) X_0, Y_0, Z_0 [м] по координатным осям OX, OY, OZ и углами поворота, φ_x, φ_y, φ_z [рад] объекта вокруг осей, $O'X'$, $O'Y'$, $O'Z'$, отсчитываемыми относительно равновесных (нулевых) значений (рис. 7).

В тех случаях, когда подвешиваемым объектом является некоторая вращающаяся роторная система, координатная ось $O'Z'$ совпадает с осью вращения. Если же вращение объекта принципиально отсутствует (например, при подвесе некоторой платформы), ориентация координатных осей выбирается на основе каких-либо других объективно обусловленных соображений.

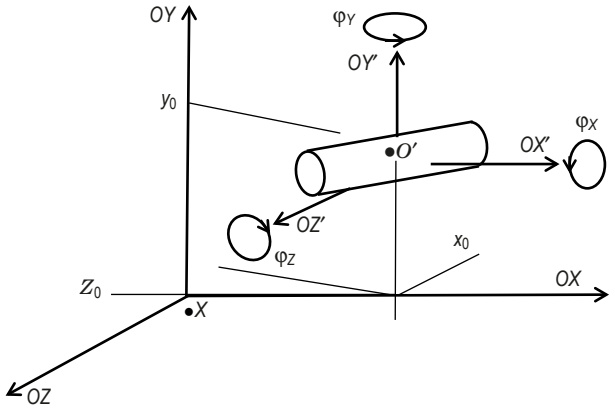


Рис. 6. Системы координат OXYZ O'X'Y'Z', описывающих пространственное положение подвешиваемого объекта

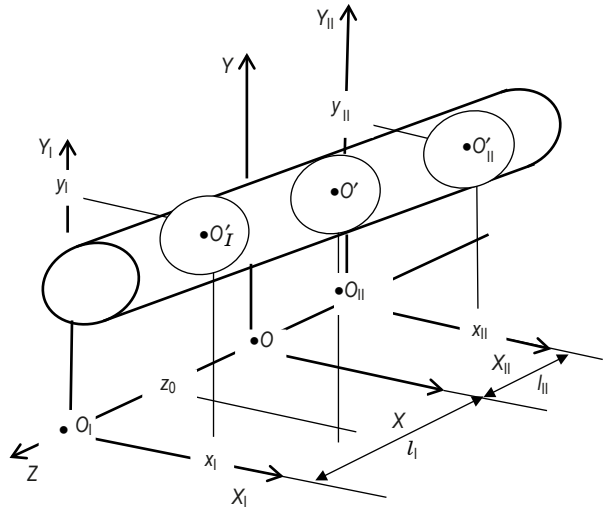


Рис. 7. Системы координат осей $O_IY_IZ_I, O_{II}Y_{II}Z_{II}$

Отметим, что при вращении ротора угол его поворота φ_z вокруг оси *O'Z'* может принимать практически любое значение:

$$\varphi_z = \overline{\varphi}_z \pm 2\pi \cdot n,$$

где n – число полных оборотов роторной системы;

$0 \le \overline{\varphi}_z \le 2\pi$ [рад] – угол поворота ротора в пределах одного его оборота.

Другая из возможных систем координат, применяемая для описания пространственного положения роторных систем, включает в себя две неподвижные двухмерные прямоугольные системы координатных осей $O_IY_IZ_I$, $O_{II}Y_{II}Z_{II}$ и координатную ось *OZ*. При этом центры координатных систем $\bullet O_I$, $\bullet O_{II}$ лежат на оси *OZ*, их положения относительно ЦМ объекта $l_1=|OO_1|$, $l_2=|OO_2|$ определяются положениями плоскостей силового воздействия радиальных или конических активных магнитных подшипников (АМП), а координатные оси O_IX_I, $O_{II}X_{II}$, O_IY_I, $O_{II}Y_{II}$ ориентированы так, что $O_IX_I \uparrow\uparrow O_{II}X_{II} \uparrow\uparrow OX$, $O_IY_I \uparrow\uparrow O_{II}Y_{II} \uparrow\uparrow OY$.

В данной системе координат пространственное положение ротора определяется смещениями (по соответствующим осям) x_1, y_1, x_{II}, y_{II} [м] геометрических центров $\bullet O'_I$, $\bullet O'_{II}$ сечений тела ротора плоскостями $O_IX_IZ_I$, $O_{II}X_{II}Z_{II}$, а также смещением ЦМ Z_0 [м] и углом поворота φ_z [рад].

Отметим, что величины смещения Z_0 и угла φ_z в обеих системах координат будут принимать одни и те же значения, а связь величин x_1, y_1, x_{II}, y_{II} с величинами, x_1, y_1, φx, φ_y при наличии объективно обусловленных и подтверждаемых на практике предположений об их малости (по сравнению с геометрическими размерами ротора) определяется соотношениями:

$$x_I = x_0 + l_I \cdot \varphi_y \qquad y_I = y_0 - l_I \cdot \varphi_x$$
$$x_{II} = x_0 - l_{II} \cdot \varphi_y \qquad y_{II} = y_0 + l_{II} \cdot \varphi_x$$

Имеют место и обратные соотношения:

$$x_0 = \frac{l_{II} \cdot x_I + l_I \cdot x_{II}}{l_I + l_{II}} \qquad y_0 = \frac{l_{II} \cdot y_I + l_I \cdot y_{II}}{l_I + l_{II}}$$
$$\varphi_x = \frac{y_{II} - y_I}{l_I + l_{II}} \qquad \varphi_y = \frac{x_I - x_{II}}{l_I + l_{II}}$$

В качестве электрических переменных, описывающих состояние САМП выступают токи в рабочих обмотках АМО I_j [А] (j=1,2..., K) являющиеся по своей сути аналогами обобщенных скоростей – производных по времени от электрических обобщенных координат – электрических зарядов. Их количество К определяется общим количеством рабочих обмоток АМО, входящих в состав САМП, а также степенью детализации (уровнем адекватности описания электромагнитных процессов), принимаемой при проектировании и сопутствующих расчетах.

Так как электромагнитная сила по своей природе является силой притяжения, для ее создания в одном конкретном направлении необходима одна отдельная независимая рабочая обмотка и один, соответствующим образом пространственно ориентированный магнитопровод. Следовательно, одна радиальная АМО будет содержать четыре рабочих обмотки, обеспечивающие создание электромагнитныех сил, действующих (в противоположных направлениях) по координатным осям *OX*, *OY*. Соответственно, одна осевая АМО, обеспечивающая создание электромагнитных сил, действующих в противоположных направлениях координатной

оси *OZ*, будет содержать две рабочие обмотки (рис. 8). В конической АМО, где каждая независимая рабочая обмотка обуславливает создание электромагнитных сил, составляющие (проекции) которых, определяемые углом конусности γ_k [рад], действуют одновременно по двум координатным осям *OX*, *OZ* и (или) *OY*, *OZ*, количество рабочих обмоток равно четырем (рис. 9).

$$\vec{F}_X = \vec{F}_X^{(+)} - \vec{F}_X^{(-)} \quad \vec{F}_Y = \vec{F}_Y^{(+)} - \vec{F}_Y^{(-)} \quad \vec{F}_Z = \vec{F}_Z^{(+)} - \vec{F}_Z^{(-)}$$

$$\vec{F}_{XI} = \cos\gamma_K \cdot \left(\vec{F}_{XIZ}^{(+-)} - \vec{F}_{XIZ}^{(--)} \right)$$

$$\vec{F}_{YI} = \cos\gamma_K \cdot \left(\vec{F}_{YIZ}^{(+-)} - \vec{F}_{YIZ}^{(--)} \right)$$

$$\vec{F}_{XII} = \cos\gamma_K \cdot \left(\vec{F}_{XIIZ}^{(++)} - \vec{F}_{XIIZ}^{(-+)} \right)$$

$$\vec{F}_{YII} = \cos\gamma_K \cdot \left(\vec{F}_{YIIZ}^{(++)} - \vec{F}_{YIIZ}^{(-+)} \right)$$

$$\vec{F}_Z = \sin\gamma_K \cdot \left(\vec{F}_{XIIZ}^{(++)} + \vec{F}_{XIIZ}^{(-+)} + \vec{F}_{YIIZ}^{(++)} + \vec{F}_{YIIZ}^{(-+)} - \right.$$
$$\left. - \vec{F}_{XIZ}^{(+-)} - \vec{F}_{XIZ}^{(--)} - \vec{F}_{YIZ}^{(+-)} - \vec{F}_{YIZ}^{(--)} \right)$$

Таким образом, для САМП роторной системы, содержащей два радиальных и один осевой АМП K=10, а для САМП, включающей в себя два конических АМП K=8. В общем случае подвеса некоторого объекта, обладающего шестью степенями свободы (платформ) K=12. Отметим, что в силу функционального назначения электромагнитов АМО – создания электромагнитных сил, действующих на подвешиваемое тело, асимптотически установившиеся равновесные нулевые значения механических координат будут обеспечиваться только в условиях асимптотически установившихся равновесных значений токов в их обмотках $I_j \to I_{0j}$=const j=1, 2, ...K.

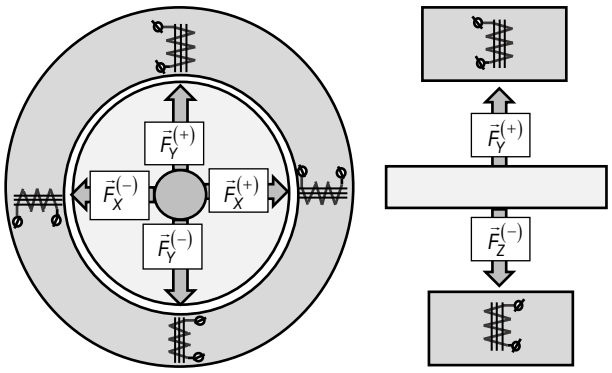


Рис. 8. Рабочие обмотки и составляющие электромагнитных сил радиальной (оси OX, OY) и осевой (ось OZ) АМО

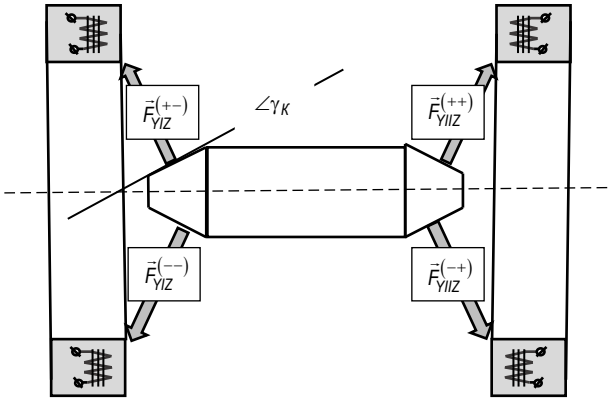


Рис. 9. Рабочие обмотки и составляющие электромагнитных сил конической АМО (плоскости XOZ, YOZ)

В некоторых практических случаях при расчетах динамических электромагнитных процессов, протекающих в системе, возникает необходимость учитывать проводимость материала магнитопроводов АМО. Для этого в расчетную модель системы вводят несколько замкнутых электрических контуров, в которых протекают некоторые эквивалентные токи, соответственно увеличивая, тем самым, количество электрических переменных, описывающих состояние САМП [5].

В теории электромеханических систем рассматриваются также математические модели, в которых в качестве электрических переменных вместо токов I_j используются потокосцепления Ψ_j [Вб] (j=1, 2, ...K) соответствующих контуров (обмоток), являющиеся электрическими аналогами механических импульсов (количеств движения). Однако ввиду технических трудностей адекватного измерения текущих значений данных величин, в составе расчетных статической и динамических моделей САМП они используются, большей частью, только в качестве промежуточных (вспомогательных) переменных [1].

Характеристику внешних силовых воздействий на подвешиваемый объект можно классифицировать следующим образом (рис. 10).

При расчетах и проектировании САМП изначально предполагается, что кроме компенсации веса подвешиваемого тела система должна отра-

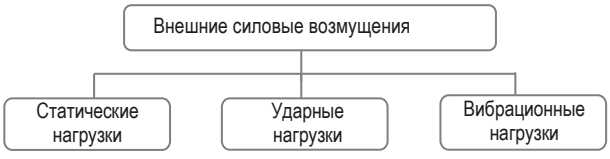


Рис. 10. Классификация возмущающих сил

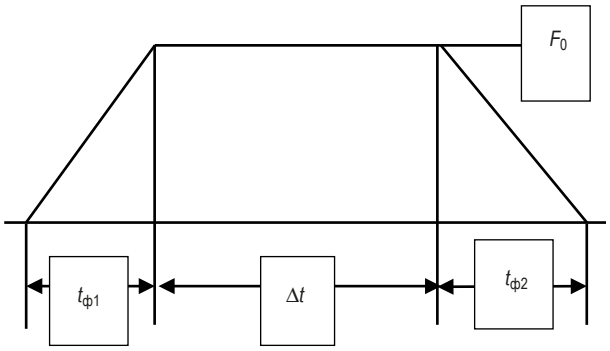


Рис. 11. Эпюра статической (ударной) нагрузки

батывать без потери устойчивости и другие возможные статические нагрузки. Характеристики таких нагрузок определяются следующими параметрами (рис. 11):

– уровнем нагрузки F_0 [Н];

– временем действия нагрузки Δt [с];

– крутизной фронтов $t_{ф1}$, $t_{ф2}$, [с].

В зависимости от величин временных интервалов, $t_{ф1}$, Δt различают:

– ступенчатую статическую нагрузку $t_{ф1} < 2 \div 3$ [мс], $\Delta t > 10 \div 15$ [мс],

– импульсную статическую нагрузку $t_{ф1} < 2 \div 3$ [мс], $\Delta t \le 10 \div 15$ [мс],

– ударную нагрузку $t_{ф1} \to 0$, $\Delta t < 2 \div 3$ [мс].

Для ударной нагрузки в динамических расчетах может быть использована агрегированная величина ударного импульса $F_0\ \Delta t$ [Н·с] или энергия удара E_0 [Дж], связанных между собой соотношениями:

$$\hat{E}_0 = \frac{1}{2} m \cdot \left(\frac{\hat{F}_0 \Delta t}{m} \right)^2 = \frac{\left(\hat{F}_0 \Delta t \right)^2}{2m} \quad \left(\hat{F}_0 \Delta t = \sqrt{2m\hat{E}_0} \right).$$

Заключение

Приведенная конструкция САМП обеспечивает устойчивую работу системы и надежное функционирование всей элементной базы. Выполнен расчет технических характеристик САМП. Разработанная математической модель позволяет рассчитать динамические характеристики и оценить остаточный ресурс технической системы с учетом возмущений. Обозначенные внешние силовые возмущения система должна отрабатывать без потери устойчивости.

Библиографический список

1. *Журавлев Ю. Н.* Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение. СПБ: Политехника, 2003 206 с.

2. *Зотов И. В., Лисиенко В. Г.* Магнитные подшипники для системы автоматического управления электромагнитным подвесом роторов турбогруппы газотурбины теплоэлектроцентралей // Электротехника. 2010. № 3. С. 8 –14.

3. *Поляхов Н. Д., Стоцкая А. Д.* Обзор способов практического применения активных магнитных подшипников // Научное приборостроение. 2012. Т. 22. № 4. С. 5–18.

4. *Флора В. Д.* Электрические машины специальных конструкций и принципов действия. Запорожье, 2011. 254 с.

5. *Schweitzer G.* Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery Springer Science & Business Media, 2009. P. 535.

УДК 658.26 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1705-0-2022-17-226-234**

О. Я. Солёная*
кандидат технических наук, доцент
А. Ю. Стекленев*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

В статье приводится описание особенностей эксплуатации локальных систем энергоснабжения. Обозначены виды помех в электрической сети и показатели качества электроэнергии. Проведен анализ нормативных документов, регламентирующих тарифы на электроэнергию.
Ключевые слова: *качество энергии, кондуктивные помехи, система энергоснабжения, электроэнергия.*

O. Y. Solenaya*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. Y. Steklenev*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

LOCAL POWER SUPPLY SYSTEMS

The article provides a description of the features of the operation of power supply systems. The types of interference in the observations of the network and indicators of the quality of electricity are indicated. The analysis of regulatory documents regulating electricity tariffs has been carried out.
Keywords: *power quality, conducted interference, power supply system, electric power.*

Актуальность

В Российской Федерации промышленные и бытовые потребители электроэнергии в большинстве случаев подключены к централизованным энергосистемам, а использование альтернативных вариантов снабжения (изолированные источники энергоснабжения) проявлялось лишь в случае невозможности подключения к централизованной системе либо отсутствия возможности подключения к системе, например, в некоторых районах Крайнего Севера или в горной местности [1]. Однако в современных реалиях количество потребителей и, следовательно, нагрузка в электросети постоянно возрастают, в связи с чем в некоторых случаях удовлетворение спроса на энергию за счет подключения новых потребителей может столкнуться с рядом трудностей:

– увеличение затрат на передачу электроэнергии из централизованных систем в отдаленные районы;

– размер платы за подключение к централизованным системам.

В силу этого некоторым потенциальным потребителям (например, коттеджный поселок, находящийся в отдалении от централизованной системы энергоснабжения) выгоднее использование собственных локальных источников энергоснабжения. Актуальность применения подобных систем подтверждает непрекращающийся рост тарифов на электроэнергию – например, только в Санкт-Петербурге за период со 2-й половины 2012 года по 2-ю половину 2021 года (рис. 1) тариф на электроэнергию вырос на 67 % [2].

Подтверждает данные положения тот факт, что немалая часть нашей страны не имеет доступа к централизованной системе энергоснабжения в силу их расположения и экстремальных климатических условий. Так, например, в Республике Саха лишь 36 % территории охвачено централизованным энергоснабжением [3].

Показатели качества электроэнергии

При энергоснабжении потребителя энергия поставляется в определенном количестве и качестве, определяемом степенью соответствия заданным параметрам. Ухудшение качества энергии приводит к нарушению режима работы, падениям напряжения, изменению частоты, сни-

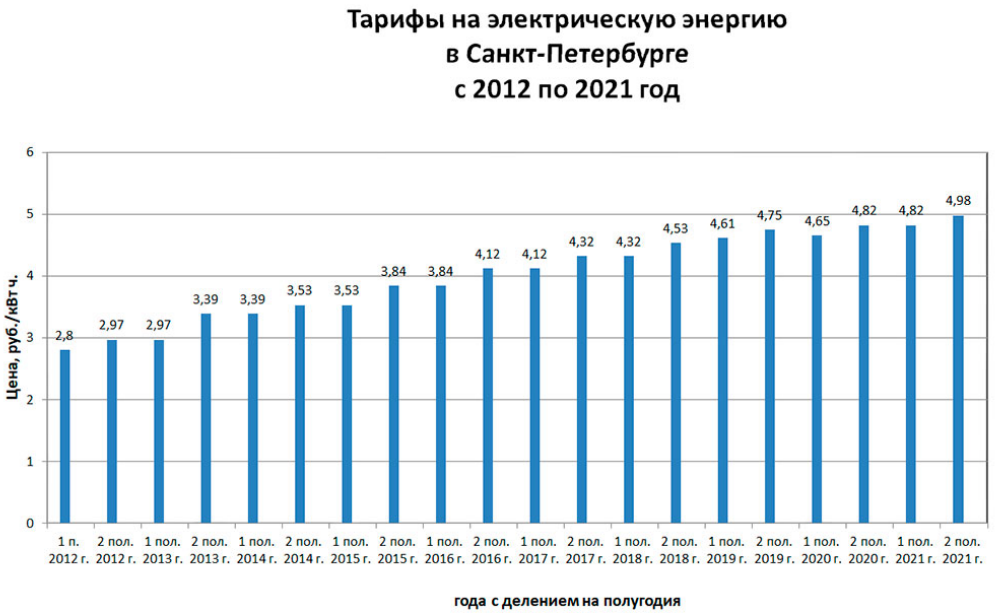


Рис. 1. Изменение тарифов на электроэнергию в Санкт-Петербурге с 2012 по 2021 год

жению надежности оборудования. С целью предотвращения описанных негативных последствий необходимо осуществлять управление качеством энергии посредством непрерывного мониторинга показателей качества.

В связи с наличием изменений режима работы систем электроснабжения, вывода оборудования в ремонт, проведения различного рода коммутаций в электрических сетях мощность нагрузок часто претерпевает изменения. В результате происходит *отклонение напряжения* δU, от номинального значения $U_{ном}$

$$\delta U, \text{ В} = U - U_{ном},$$

где U – фактическое значение напряжения.

При наличии значения усредненного напряжения в точке энергоснабжения $U_у$ (за определенной интервал) возможно определить *установившееся отклонение напряжения* $\delta U_у$:

$$\delta U_у, \text{ В} = U_у - U_{ном}.$$

Во время работы сети при резком изменении нагрузки, например, при отключении или подключении большого числа потребителей, при пуске двигателей происходит колебание напряжения. Разность между амплитудным или действующим значением до и после одиночного изменения напряжения определяет *размах изменения напряжения* δU_t, %:

$$\delta U_t = \frac{|U_i - U_{i+1}|}{U_{ном}} 100,$$

где U_i, U_{i+1} – значения следующих один за другим изменений напряжения. Качество энергии в данном случае может соответствовать стандартам, если значение размаха не превышает допустимого уровня согласно графикам зависимости допустимых размахов изменений напряжения от частоты повторений изменения.

Колебания напряжения в сети наводят соответствующие колебания светового потока, проявляющиеся в виде мерцания света. Степень восприимчивости человеческого органа зрения к воздействию такого рода колебаний характеризуется *дозой фликера* P_t. Для измерения этой величины применяется специальный прибор – фликерметр, модулирующий зависимость чувствительности глаза в виде амплитудно-частотной характеристики. Дозу фликера подразделяют на кратковременную P_{St} и долговременную P_{Lt} в зависимости от интервала времени наблюдения (2 минуты и 2 часа соответственно) с допустимыми значениями в 1,38 и 1,0.

При работе оборудования на высоком уровне напряжения на выводах трансформаторов при повышенных значениях магнитной индукции в сердечниках потребители с нелинейными вольтамперными характеристиками начинают генерировать в сеть напряжение и токи частоты, не соответствующей номинальной. К таким энергопотребителям относят: люминесцентные лампы, индукционные печи, частотные преобразователи. Их воздействие выражается в гармоническом искажении синусоидальной формы сигнала (появление высших гармоник). Таким образом, кривая напряжения приобретает несинусоидальность, степень которой формируют два коэффициента:

• коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U:

$$K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U^2_{(n)i}}}{U_{(1)i}},$$

где $U_{(n)i}$ – действующее значение n-й гармонической составляющей напряжения, В;
$U_{(1)i}$ – действующее значение напряжения основной частоты, В.

• коэффициент n-й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)i}$

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U_{(1)i}} 100.$$

Оба параметра определяются путем установления действующих значений гармонических составляющих напряжения для i-го наблюдения. Качество электроэнергии по данным параметрам соответствует требованиям настоящих стандартов если в течение 24 часов наиболее вероятное значение коэффициентов не превышает нормально допустимое значение, а максимальное значение не превышает предельный уровень.

В электрической сети непостоянными во времени являются не только общая нагрузка, но и отдельные нагрузки каждой из фаз, источниками изменений которых служат осветительные приборы, сварочное оборудование, тяговые нагрузки, короткие замыкания или обрыв проводов. В результате значение нагрузок отдельных фаз различны, что приводит к наложению напряжений прямой и обратной последовательности друг на друга. Вследствие этого возникает *нессиметрия напряжения*, характеризуемая двумя параметрами: *коэффициентами нессиметрии напряжения по нулевой* K_{0U} и *обратной последовательности* K_{2U}:

$$K_{0Ui} = \frac{U_{0(1)i}}{U_{\text{ном.ф}}} 100; \quad K_{2Ui} = \frac{U_{2(1)i}}{U_{1(1)i}} 100,$$

где $U_{\text{ном. ф}}$ – номинальное значение фазного напряжения;

$U_{2(1)i}$, $U_{1(1)i}$,$U_{0(1)i}$ – действующие значения напряжений при обратной, прямой и нулевой последовательностей основной частоты системы.

Качество электроэнергии по вышеуказанным коэффициентам соответствует нормативным требования при временной продолжительности отклонения от нормально допустимого значения не более чем 5 % от периода наблюдения.

Различные изменения в показателях работы электросети, такие как снижение или повышение мощностей нагрузки, выход оборудования из строя, могут привести не только к колебаниям напряжения, но и к отклонению усредненного значения частоты $f_{\text{у}}$ от номинального $f_{\text{ном}}$:

$$\Delta f = f_{\text{у}} - f_{\text{ном}}.$$

Итогом подобных режимов являются изменение скорости вращения двигателей, перегрев электрооборудования. Согласно [4] частота в ЕЭС России должна поддерживаться на уровне f=50±0,1 Гц. Допускается кратковременная работа с отклонением частоты до Δf=±0,2 Гц.

Аварии на участках сети, короткие замыкания с последующим отключением части оборудования приводят к резкому снижению напряжения ниже уровня $0{,}9U_{\text{ном}}$, именуемого *провалом напряжения*. Данное явление характеризуется по времени длительностью провала Δt_n, с; и по отклонению минимального значения напряжения от номинального уровня – глубиной провала $\delta U_{\text{н}}$. Благодаря ликвидации причины аварийной ситуации или срабатыванию автоматической защиты напряжение восстанавливается до первоначального или близкого к нему значения.

Искажение формы сигнала напряжения может происходить не только из-за проявления высших гармоник, но и в результате воздействия высокочастотных импульсов, возникающих при коммутациях в сети, переходных процессах, грозовых разрядах. В итоге происходит *импульс напряжения* – резкое изменение его значения, описываемое временной продолжительностью, амплитудным и мгновенным значениями. При номинальном напряжении сети в 220 кВ импульсное значение составляет 705 кВ [5].

Также результатом коммутационных процессов и коротких замыканий становится временное перенапряжение в сети, проявляющееся в виде превышения напряжением в 1,1 от $U_{\text{ном}}$. Отношение максимального значения напряжения огибающей амплитудных значений к амплитуде номинального напряжения определяет *коэффициент временного перенапряжения* $K_{\text{пер}U}$ [6]:

$$K_{\text{пер}U} = \frac{U_{a\max}}{\sqrt{2}U_{\text{ном}}} 100.$$

Принципы управления энергоптреблением

Управление энергопотреблением заключается в оптимизации процессов энергопотребления и энергоснабжения для повышения энергоэффективности, снижения потерь и расходов электроэнергии. Структурной основой управления потреблением энергии служит энергосбережение – комплекс мер по экономичному и эффективному

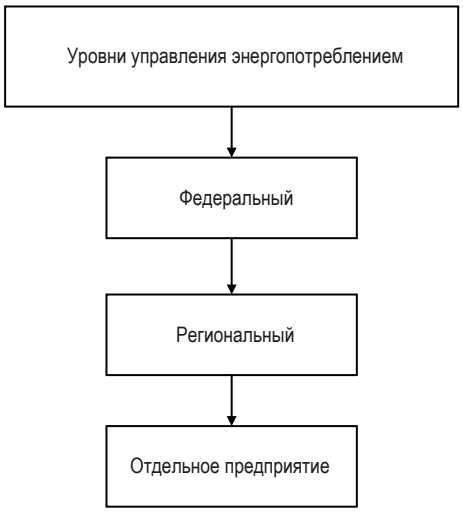


Рис. 2. Уровни управления энергопотреблением

расходу энергоресурсов. Государственная политика в области энергопотребления и энергосбережения проводится на трех уровнях (рис. 2).

На федеральном уровне осуществляется создание надзорных ведомств (Министерство энергетики, Министерство промышленности), осуществляющих правовое регулирование энергопотребления путем издания соответствующих законодательных инициатив, таких как разработка стандартов энергоэффективности, проведение энергоаудита. Также происходит установление государственного контроля тарифов на электроэнергию; совершенствование правовых аспектов регулирования: обозначение четких требований по энергоэффективности оборудования и технологий, законодательный запрет ввода энергетически неэффективных строений.

На региональном уровне выполняются аналогичные меры в пределах полномочий соответствующих органов, проводится экономическое стимулирование использования энергосберегающих технологий (выдача государственных кредитов, снижение налогообложения).

На уровне отдельного предприятия производится мониторинг энергопотребления, нормирование расхода электроэнергии. Также неотъемлемыми мерами являются учет баланса энергоресурсов, проведение анализа эффективности расходов, внедрение технологий энергосбережения и контроля уровня потребления [7].

Анализ нормативной базы, регламентирующей тарифы электроэнергии

Электроэнергия, как и любой товар, помимо качества обладает определенной стоимостью. Продажа и покупка энергии осуществляется на специальных торговых площадках, именуемых рынками. Обращение электрической и тепловой энергии и мощности в промышленном масштабе происходит на *оптовом рынке*, к участникам (субъектам) которого относят крупные производители (генерирующие компании) и энергосбытовые организации, выступающие в роли энергопотребителей. Обращение энергии и мощности на уровне энергоснабжающей компании потребитель осуществляет на *розничном рынке*, субъекты которого состоят в основном из «бытовых» потребителей энергии (жилые дома, офисные помещения) и исполнителей коммунальных услуг.

Оптовый рынок подразделяется на два региона – формирование равновесной цены происходит в *ценовой зоне*. Территории, на которых торговля энергией и мощностью происходит на основании регулируемых тарифов, образуют *неценовые зоны* оптового рынка. К таким на сегодняшний день относятся Дальневосточный федеральный округ, Республика Коми и Калининградская область [8].

В отношениях между поставщиками и потребителями возникает необходимость правового регулирования. С этой целью применяется двухсторонний договор купли-продажи, условия которого заключаются в обязанности поставщика поставить энергию (мощность) в требуемом количестве, а в обязанности покупателя заплатить за полученную энергию в соответствии с положениями договора. В соответствии с ФЗ «Об энергетике» данные субъекты рынка обязаны заключить договор энергоснабжения с любым обратившимся лицом, желающим приобрести энергию (мощность) и находящимся в зоне деятельности поставщика [9]. В настоящее время правовое регулирование в области тарифов на электроэнергию осуществляется органом регулирования, представленным соответствующим органом исполнительной власти субъекта РФ, например, комитет по тарифам Санкт-Петербурга или Региональная энергетическая комиссия Омской области. Срок действия утвержденных тарифов составляет не менее 12 месяцев, однако возможны исключения, прописанные федеральным законом или постановлением Правительства РФ. В случае необходимости технологического присоединения объекта к системе энергоснабжения на основании расходов на мероприятия в ходе подключения определяется размер оплаты в порядке, установленном Правительством Российской Федерации.

Топливно-экономический комплекс (ТЭК) формирует около 50 % доходов федерального бюджета и вносит вклад в ВВП страны порядка

25 %, в связи с чем, помимо вышеописанной необходимости управления энергопотреблением, был создан документ, определяющий цели и задачи развития и управления энергетикой государства в целом – Энергетическая стратегия России на период до 2035 года [10]. Несмотря на гарантию энергобезопасности страны за счет преобладания производства первичной энергии над внутренним потреблением более, чем в 2 раза, энергетический сектор РФ сталкивается с рядом проблем: повышенная таможенно-тарифная нагрузка на ТЭК в силу экспортно-сырьевой модели развития российской экономики; постепенное истощение действующих и ухудшение качества открываемых месторождений; низкие темпы экономического роста, обновления производственных фондов; высокая зависимость от внешнеэкономической конъюктуры.

Целью стратегии является решение вышеописанных внешних и внутренних проблем, внесения изменений в модель развития энергетического комплекса страны. Необходима структурная перестройка сектора, которая подразумевает повсеместное внедрение энергосберегающих технологий, возрастание роли возобновляемых источников энергии (ВИЭ), экологически чистой продукции; проведение импортозамещения в субъектах ТЭК.

В области электроэнергетики ключевые задачи состоят в:

- замене устаревшего оборудования на требуемый объем новых мощностей с преобладанием использования отечественных технологий;
- модернизации сетей, внедрении «умных» систем учета и контроля электроэнергии;
- реализации «дорожной карты» повышения энергетической эффективности зданий, сооружений и строений;
- уменьшении негативного влияния добычи и потребления энергоресурсов на окружающую среду;
- налоговом и таможенно-тарифном стимулировании в выполнении данных мер.

Основными ожидаемыми результатами реализации Стратегии являются: снижение энергоемкости российской экономики в 1,3–1,5 раза; стабильное удовлетворение возрастающего внутреннего спроса на энергию благодаря увеличению производства первичной энергии. При этом прогнозируемые итоги состоят из: ликвидации изношенных фондов с заменой их на обновленные; развитии импортозамещения; интеграции ВИЭ в энергосистему. Предполагаемый рост производства возобновляемой энергии составит 13–20 раз относительно текущих показателей. Ежегодно проводится мониторинг степени реализации Стратегии с оценкой показателей развития отраслей ТЭК, определением рисков и возможностью их устранения [11].

Виды помех в ЛСЭ

При эксплуатации ЛСЭ возникают различные изменения режимных параметров, вызванные статическими и динамическими возмущениями в электрической сети, которые сопровождаются наличием помех – импульсных, высокочастотных и электромагнитных.

Импульсные помехи представляют собой кратковременное (порядка 1 мкс) повышение амплитуды напряжения до нескольких кВ. Причинами возникновения данного явления в сети могут быть как природные факторы (грозовой разряд вблизи ЛЭП), так и техногенные (короткое замыкание, авария на участке сети), а также свой вклад вносят одновременное включение/выключение большого числа электропотребителей. Импульсные помехи могут проявляться как в виде одиночных импульсов, так и в виде последовательности их произвольной длительности со случайным временным промежутком. Так как промежуток между появлением имульсов значительно больше длительности самого импульсного шума, возникновение отдельного импульса возможно рассматривать как независимое событие, вероятность которого подчиняется Пуассоновскому распределению:

$$P(n) = (\gamma T)^n \frac{e^{-\gamma T}}{n!},$$

где γ – среднее число импульсов в единицу времени;

$P(n)$ – вероятность появления n импульсов за время T.

Главным негативным эффектом импульсных помех является перенапряжение, способное привести к выводу оборудования из строя, короткому замыканию, разрушению изоляции [12].

Высокочастотные помехи в сети вызывают импульсные сигналы в диапазоне частот 100 Гц – 30 МГц. Основными источниками являются высшие гармоники несинусоидальных сигналов, которые тем выше, чем быстрее меняется амплитуда сигнала, что приводит к возникновению высокочастотных помех при процессе коммутации. Также на величину высокочастотных помех лияют преднамеренное излучение (радиостанции, радары) и непреднамеренное (цифровые приборы, люминесцентные лампы). Длительные высокочастотные помехи искажают сигнал напряжения питания и могут

привести к изменению частоты тока, увеличить степень акустических шумов, повысить потери в силовом оборудовании и привести к его нагреву, что в итоге способно вызвать пробой изоляции [13].

Электромагнитные помехи – электромагнитное воздействие, выражающееся в виде электромагнитной индукции или излучения, нарушающие нормальное функционирования технического средства, которое во время работы находится в определенной *электромагнитной обстановке* – электромагнитном процессе в заданной области пространства. Если параметры корректного функционирования технического средства внутри электромагнитной обстановке не нарушаются, при этом не создаются помехи другим техническим средствам, такое техническое средство обладаем электромагнитной совместимостью [14]. Наиболее распространенными источниками электромагнитных помех служат переходные процессы в цепях (при коротких замыканиях, коммутациях силовых выключателей, срабатывании защитного оборудования) и поля (электрические, магнитные) промышленной частоты, порождаемые силовым оборудованием. Электромагнитные помехи способны распространятся в виде электромагнитных полей в проводящих средах, в таком случае их называют *излучаемыми*. При растространении посредством токов в непроводящих средах ЭМП относят *к кондуктивным* помехам. Наведенные электромагнитные помехи приводят к искажению сигналов в сети, перегреву оборудования вплоть до возгорания, вносят вклад в отклонение напряжения и частоты от номинальных значений.

Способность транспортного средства сохранять заданное качество функционирования при воздействии на него внешних помех с регламентируемыми значениями параметров в отсутствии дополнительных средств защиты от помех характеризуется *помехоустойчивостью* [15]. Данный параметр требует проверки перед вводом транспортного средства в эксплуатацию, с целью чего проводят специальные испытания. Источником помех в данном случае выступают испытательные генераторы (рис. 3). Другими видами воздействий, на устойчивость к которым проверяют испытуемое оборудование являются *электростатические разряды* – помехи, наведенные радиочастотными электромагнитными полями [16].

В зависимости от значения напряжения холостого хода и полосы частот испытанию присваивается степень жесткости, повышаемая с увеличением указанных параметров.

Локальные системы энергоснабжения

Любая система энергоснабжения характеризуется объединением источников энергии и электроустановок, обеспечивающих ее транспортировку до потребителя. Локальная система энергоснабжения подразумевает приближение источника к потребителю. Наиболее распространенными электропотребители в составе локальной системы энергоснабжения являются дачные поселки и удаленные микрорайоны. Классификация локальной системы энергоснабжения приведена на рис. 4.

Ключевыми принципами создания локальных систем являются: зонирование – разделение потребителей по зонам (населенный пункт, район, субъект РФ) и децентрализация – обеспечение стабильного функционирования системы в случае возникновения перебоев в снабжении за пределами локальной системы энергоснабжения.

Для обеспечения выполнения данных принципов электростанции, используемые в системе, должны быть автономными и способными самостоятельно производить энергию, в связи с чем появляется возможность использовать локальную систему энергоснабжения для подачи энергии во внешнюю сеть посредством распреде-

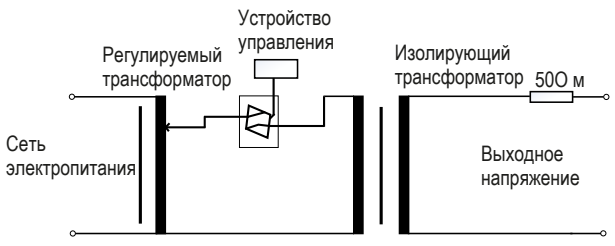


Рис. 3. Схема испытательного генератора помех на частоте 50 Гц

Рис. 4. Классификация ЛСЭ

лительных линий. Такое подключение позволит покрыть дефицит мощности за счет ее потребления из внешней сети. В настоящее время подобный способ реализуется в Московской области, которая представляет собой энергодефицитный регион, чья потребность в мощности удовлетворяется посредством межсистемных связей с соседними энергосистемами [17].

Классификация локальной системы энергоснабжения (ЛСЭ)

Разделение ЛСЭ зависит от типов ее составляющих:

– *по типу используемых электростанций*: автономные электростанции ЛСЭ могут быть не только стационарными, но и передвижными: плавучая электростанция, автомобильная. По своему назначению электростанции могут выполнять функции основного источника электроснабжения (при самостоятельной генерации) и резервного (в случае потребления энергии из внешней сети). В качестве источника питания используются генераторные установки (дизельные, бензиновые), для питания небольшого частного дома возможно применение малых автоматизированных гидротурбин. Отдельно выделяются станции, основанные на возобновляемых источниках энергии, в частности, солнечные батареи и ветрогенераторные установки [18];

– *по структуре и составу оборудования распределительных электросетей* ЛСЭ возможно разделить по видам трансформаторов; виду и частоте тока; наличию полупроводниковых и/или электрохимических преобразователей (аккумуляторов); наличию систем электрической защиты и компенсации реактивной мощности. При этом распределительные сети могут быть расположены как на открытых площадках, так и внутри помещений;

– *по составу электропотребителей ЛСЭ делятся на*: промышленные (заводы, фабрики) и бытовые (жилые помещения). Отдельно выделяют потребителей 1-й и 2-й категории энергоснаб-

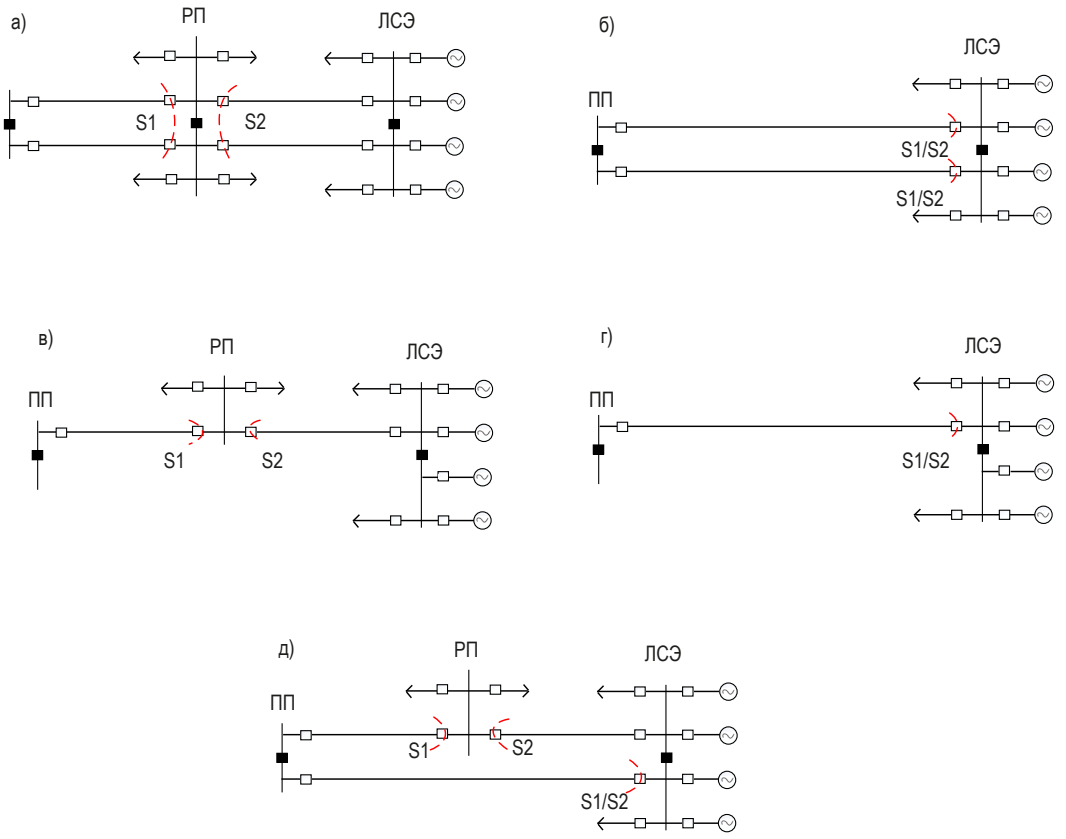


Рис. 5. Типовые схемы присоединения ЛСЭ к внешней сети: а – две станции ЛСЭ присоединены к ПП двумя синхронными связями через промежуточный РП; б – две станции ЛСЭ присоединены к ПП двумя синхронными связями; в – две станции ЛСЭ присоединены к ПП одной синхронной связью через промежуточный РП; г – две станции ЛСЭ присоединены к ПП одной синхронной связью; д – одна станция ЛСЭ присоединена к ПП через промежуточный РП, а вторая напрямую

жения в силу необходимости сооружения резервного источника питания;

– *по способу подключения к внешней сети* (рис. 5) [19].

Преимущества использования ЛСЭ

Основными достоинствами применения ЛСЭ являются:

• снижение затрат на транспортировку энергии за счет приближения источника к потребителю;

• уменьшение тарифов для потребителей, находящихся вне зон централизованного энергоснабжения;

• возможность бесперебойной работы в силу автономности от внешней сети;

• расширение применения возобновляемых источников энергии;

• снижение и равномерность распределения нагрузки на окружающую среду;

• возможность в короткие сроки решить задачу энергообеспечения отдельных потребителей, у которых нет доступа к централизованной системе энергоснабжения. В частности, вся энергосистема Ненецкого автономного округа формируется местными 34 дизельными электростанциями [20].

Заключение

Анализ особенностей применения локальных систем энергоснабжения в современной энергосистеме Российской Федерации показал перспективность и ряд преимуществ их использования, особенно на обширных территориях арктических регионов, значительная часть которых не имеет доступа к централизованному энергоснабжению в силу природно-географических и климатических факторов. ЛСЭ также способствует развитию местного производства ввиду территориального приближения источника к потребителям и, как следствие, стимулирует использование отечественных технологий, что становится особенно актуальным в условиях угрозы введения экономических санкций производителями импортного оборудования или ограничения доступа ко внешним ресурсам во время пандемии.

Библиографический список

1. *Зайченко В. М., Чернявский А. А.* Сравнение характеристик распределенных и централизованных схем энергоснабжения // Промышленная энергетика. 2016. № 1. С. 2–8.

2. Указ Главы Республики Саха (Якутия) от 23.04.2018 № 2515 «О схеме и программе развития электроэнергетики Республики Саха (Якутия) на 2018–2022 годы». URL: https://goo.su/apCR (дата обращения: 24.12.2021).

3. Тарифы на электрическую энергию потребителям на территории Санкт-Петербурга в 2021 году. URL: https://goo.su/Qv4 (дата обращения: 27.12. 2021).

4. Электроснабжение. Электронный учебно-методический комплекс. URL: https://goo.su/aMvJ (дата обращения: 24.01.2021).

5. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. URL: https://goo.su/agfJ (дата обращения: 24.01.2021).

6. *Сычев А. В.* Управление электропотреблением: курс лекций. Гомель: ГПТУ им. П. О. Сухого, 2006.

7. Постановление правительства РФ от 27.12. 2010 № 1172 (ред. От 25.12.2021) «Об утверждении правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности». URL: https://goo.su/bhp8 (дата обращения: 31.01.2021).

8. Федеральный закон от 26 марта 2003 г. № 35-ФЗ «Об электроэнергетике». URL: https://goo.su/b4Ic (дата обращения: 31.01.2021).

9. Постановление правительства РФ от 21 февраля 2011 г. № 97 «Об утверждении типового положения об органе исполнительной власти субъекта Российской Федерации в области государственного регулирования тарифов» (с изменениями и дополнениями). URL: https://goo.su/bfrz (дата обращения 31.01.2021).

10. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года. URL: https://ac. gov.ru/files/content/1578/11-02-14-energostrategy-2035-pdf.pdf (дата обращения: 25.01.2022).

11. Импульсные помехи. URL: https://goo.su/b15z (дата обращения: 25.01.2022).

12. *Поляков С. А.* Причины высокочастотных помех / Сибирский федеральный университет. Красноярск, 2011.

13. ГОСТ Р 30372-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. URL https://goo.su/bwLU (дата обращения: 31.01. 2021).

14. *Гурина Л. А.* Электромагнитные помехи и методы защиты от них: учеб. пособие / Амурский государственный университет. Благовещенск, 2006.

15. ГОСТ 30805.14.2-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Бытовые приборы, электрические инструменты и аналогичные устройства. Устойчивость к электромагнитным помехам. Требования и методы испытаний. URL: https://goo.su/aTLp (дата обращения: 31.01.2021).

16. ГОСТ Р 51317.4.16-2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 0 до 150 КГЦ. Требования и методы испытаний. URL: https://goo.su/aeTG (дата обращения: 31.01.2021).

17. Передвижная электростанция Урал 4320-1912-60E5. URL: https://goo.su/agUq (дата обращения: 25.12.2021).

18. *Семендяев Р. Ю.* Разработка подсистемы восстановления нормального режима комплексной автоматики управления локальной системой энергоснабжения: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Новосибирск, 2021. 31 с.

19. Создание объекта Распределенной генерации в ЕЭС России / Курналеева А. А., Ильин С. В., Дубина Д. С. и др. // Наукосфера. № 7 (2), 2021.

20. *Иванов А. В., Складчиков А. А., Хренников А. Ю.* Развитие электроэнергетики арктических регионов Российской Федерации с учетом использования возобновляемых источников энергии // Российская Арктика. 2021 № 13. С. 62–80.

УДК 004.896

С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
А. Э. Подпорина*
студентка
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

В работе рассмотрен процесс создания цифрового двойника, раскрыты основные критерии, которые предъявляются к цифровым двойникам на международном уровне. Описаны особенности математического моделирования с учетом концепции уменьшения заказа модели. Дана оценка возможности применения цифровых двойников для моделирования электрических машин и аппаратов.
Ключевые слова: *цифровой двойник, технологический процесс, электрические машины и аппараты, электропривод, 3D-модель.*

S. V. Solyonyj*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. E. Podporina*
Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

FEATURES OF CREATING A DIGITAL TWIN

While working on the process of creating a significant twin, the main characteristics that are added to digital twins at the external level are excluded. The features of the mathematical accounting for the observed models of orders are described. An assessment of the possibility of using digital twins for modeling electrical machines and devices is given.
Keywords: *digital twin, technological process, electrical machines and devices, electric drive, 3D-model.*

Возрастающая сложность технологических процессов требует более сложных способов достижения ключевых показателей эффективности и целей промышленных предприятий. В промышленности возможность использовать технологии, которые позволяют более быстро принимать лучшие решения жизненно важно для достижения конкурентоспособных результатов. Одной из таких технологий, которую можно применять для различных типов производственных процессов, является цифровой двойник.

Цифровой двойник действует как зеркало реального технологического процесса, обеспечивая средства моделирования, прогнозирования и оптимизации физических производственных систем и процессов. Используя цифровой двойник вместе с интеллектуальными алгоритмами, можно осуществлять мониторинг и оптимизацию операций на основе данных, разрабатывать инновационные продукты, улучшать показатели качества, а также диверсифицировать создание стоимости и бизнес модели.

Для более четкого представления о цифровом двойнике электропривода будет описано видение цифрового близнеца на основе исследований. Разработка цифрового двойника, который сможет адаптировать свое поведение в реальных условиях, будь то аварийный или нормальный режим эксплуатации, это шаг к интеллектуальному производству благодаря своей надежности и безопасности. Таким образом, можно увидеть в реальном времени как поведет себя физический объект в различных режимах благодаря высокой точности.

Профессор Мичиганского университета Майкл Гривс в 2000 году предложил метафизическое понятие цифрового двойника электропривода. По его мнению, цифровой двойник состоит из трех основных компонентов:

– физического электропривода в реальных режимах эксплуатации;

– его виртуальной (математической) модели;

– данных, которые связывают эксплуатационную и виртуальную модели.

Все эти компоненты позволяют определить, как будет выглядеть цифровой двойник электропривода.

Вопрос создания цифрового двойника электропривода весьма актуален, поскольку сейчас происходит внедрение роботов, киберфизических и интеллектуальных систем, также наблюдается повсеместная цифровизация и информатизация производственных процессов.

Рассмотрим существующие цифровые двойники, в источнике [1] представлен мировой опыт создания и развития 8 возможных применений концепции цифрового двойника:

– *удаленный мониторинг и управление в реальном времени*. Как правило, практически невозможно получить физическое представление очень большой системы в реальном времени. Производительность системы можно не только контролировать, но и управлять дистанционно с помощью механизма обратной связи;

– *повышение эффективности и безопасности*. Предполагается, что цифровой двойник позволит меньше коммуницировать с людьми в области их задач или по мере необходимости. Это гарантирует, что опасные, монотонные и грязные работы поручаются роботам под управлением человека удаленно.

– *профилактическое обслуживание и планирование*. Благодаря интеллектуальному анализу данных сбои в системе могут быть обнаружены заранее. Это позволит лучше планировать техническое обслуживание и ремонта электропривода;

– *сценарий и оценка рисков*. Цифровой двойник даст возможность провести анализ вариантов, что приведет к более точной оценке рисков. Также это позволит возмущать систему, чтобы синтезировать неожиданный сценарий и изучить реакция системы, а также стратегии смягчения. Такой анализ без ущерба для реального актива возможно только через цифрового двойника;

– *улучшение внутренней синергии и сотрудничества*. Обеспечивается большая автономия и оптимизация проектного времени для улучшения синергии и сотрудничества, что ведет к повышению производительности команд разработчиков;

– *более эффективная и информированная система поддержки принятия решений*. Наличие количественных данных и расширенная аналитика в режиме реального времени поможет принимать более обоснованные и быстрые решения;

– *персонализация продуктов и услуг*. На сегодняшний день, ясно, что спрос на индивидуализированные продукты и услуги обязательно будет расти, таким образом, цифровой двойник в контекст предприятий будущего позволит более быстрое и плавно перестраивать производственный процесс под актуальные запросы общества;

– *улучшении документооборота и коммуникации*. Доступ к информации в режиме реального времени в сочетании с автоматизированной отчетностью поможет отслеживать жизненный цикл продукции на любом этапе.

Сегодня цифровые двойники являются ответом на многочисленные запросы повышения эффективности производственного процесса. Данной теме посвящено множество зарубежных и отечественных публикаций, фундаментальная сторона вопроса очень подробно раскрыта в докладе Инфраструктурного центра по развитию направления «Технет» НТИ в партнерстве с Центром компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии».

Первым важным шагом для проектирования цифрового двойника является его реализация в 2D/3D-модели, в которой представляется вся система двойника и его подсистемы. Система автоматизированного проектирования способна реализовать 3D-модель с высокой точностью. Система автоматизированного проектирования способна внедрить физические динамические показатели в 3D-модель, что позволит инженеру разработать модель в системе автоматизированного проектирования.

Учитывая сложности физического объекта и большой объем данных, расчет цифрового двойника следует рассчитывать с помощью программно-вычислительных средств, используя методы дискретизации. Одним из таких методов является метод конечных элементов. Процесс минимизации в конечном итоге будет сводиться к решению систем линейных алгебраических уравнений с двумя или тремя пространственными элементами. Этот метод подразделяет большую систему на меньшие, более простые элементы, которые и называют конечными элементами.

Данный подход возможно реализовать за счет определенной дискретизации пространства в пространственных измерениях, которые реализуются путем построения сетки объекта, то есть числовой области для решения, которая имеет конечное число точек. Формулировка крайних задач приводит к системе алгебраических уравнений. Эти простые уравнения, моделирующие данные конечные элементы, собираются в более крупную систему уравнений, которая моделирует всю проблему. Окончательная система может быть чрезвычайно большой и требовать больших вычислительных мощностей. В свою очередь вычислительная высокопроизводительная программа не сможет справиться с большими вычислениями или ей потребуется намного больше времени для расчета.

Большое время ожидания моделирования может повлечь к увеличению затрат или появлению серьезных ошибок в объекте. Основные типы универсального программного обеспечения, которое используются в мире для решения уравнений, являются ANSYS и COMSOL.

Таким образом, для контроля и управления системами в реальном времени нам необходимы

мгновенные имитации. В противном случае инженер не сможет обнаружить вовремя неисправность. Именно в такой ситуации цифровой двойник демонстрирует свои преимущества, используя модель уменьшенного порядка.

Также нужно учитывать, что уменьшение заказа модели является ключевой особенностью разработки цифрового двойника – это позволяет снизить вычислительную сложность задач.

Алгоритм уменьшения заказа модели может сжимать огромные имитационные 3D-модели так, чтобы результирующие модели уменьшенного порядка были малы для более быстрого получения оценки, чем в реальном времени. В большинстве случаев нет необходимости создавать 3D-модель для всей системы, можно создать 3D-модель для более сложной и важной детали, а для второстепенных и более простых деталей использовать 2D-модель или 1D-модель. Таким образом, это один из способов уменьшить сложность моделирования перед началом вычислений, путем уменьшения самой модели и уменьшения объема данных, которые необходимо рассчитать, а в будущем и управлять.

Чтобы описать уменьшение заказа модели при помощи математики, нужно понимать, что многие модели, разработанные на сегодняшний день, состоят из системы уравнений в частных производных или обыкновенных дифференциальных уравнений, дополненных граничными условиями [2]. Когда для описания поведения используются уравнения в частных производных, часто возникает ситуация, когда независимыми переменными являются пространство и время. Таким образом, после дискретизации в пространстве получается система обыкновенных дифференциальных уравнений во времени:

$$\frac{dx}{dt} = f(x,u);$$
$$y = g(x,u),$$

где u – вход системы; y – выход; x – переменная состояния.

Сложность такой системы характеризуется числом ее переменных состояния, то есть размерностью n вектора пространства состояний x. Уменьшение порядка модели можно рассматривать как задачу уменьшения размерности вектора пространства $x(n)$ при сохранении характера отношений ввода-вывода.

Чтобы обеспечить хорошее приближение исходной системы, необходимо выполнение некоторых условий:

– ошибка аппроксимации должна быть очень маленькой;

– сохранение свойств исходной системы, таких как стабильность (выход сигнала ограничен во временной области) и пассивность (не способен сам генерировать энергию);

– процедура редукции должна быть вычислительно эффективной.

Большинство основных методов уменьшения заказа модели основаны на подпространстве Крылова [3]. На сегодняшний день данный метод широко применяется для решения трехмерных имитационных моделей на основе дифференциальных уравнений в частных производных:

$$E\dot{x} = Ax + Bu;$$
$$y = Zx + Du,$$

где $x \in R^m, u \in R^p, y \in R^q$ и
$E_r, A_r \in R^{nxm}, B_r \in R^{mxp}, Z_r \in R^{qxm}$.

Метод Крылова позволяет вычислить проекционные матрицы $V, W \in R^{nxm}$ применительно к исходной системе, что дает возможность упростить систему пространства, заданной:

$$E_r\dot{x}_r = A_r x_r + B_r u;$$
$$y = Z_r x_r + Du.$$

Цифровые двойники, базирующиеся на описанных математических моделях, позволяющих описывать различные производственные объекты и системы с учетом основных методов уменьшения заказа модели, которые являются весьма актуальным направление в области цифровых двойников электрических машин и аппаратов [4]. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение и освоение методов Арнольди, Ланцоша, сопряженных градиентов, GMRES, BiCG, BiCGSTAB, QMR, TFQMR и MinRES.

Библиографический список

1. *Сингх Д.* Разработка и применение MOP. URL: https://www.rroij.com/open-access/mor-development-and-applications.pdf (дата обращения: 11.01.2022).

2. *Кобельков Г. М.* Численные методы. Ч. 2. М.: Мехмат МГУ, 2019. 82 с.

3. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 375 с

4. *Прохоров А., Лысачев М.* Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: Росэнергоатом, 2020. 404 с.

УДК 658.513

С. В. Солёный*
кандидат технических наук, доцент
М. С. Романова*
ассистент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ПРОДУКТА ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Рассмотрены основные модели реализации жизненного цикла высокотехнологического продукта, приведены достоинства и недостатки, возможность использования единой автоматизированной системы для управления этапами жизненного цикла.
Ключевые слова: *жизненный цикл, автоматизированная система, продукт электротехники.*

S. V. Solyonyj*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
M. S. Romanova*
Assistant
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

POSSIBLE DIRECTIONS FOR SOLVING THE PROBLEMS OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF ELECTRICAL ENGINEERING PRODUCT LIFECYCLE MANAGEMENT

The paper examines the main models for implementation of a high-tech product's life cycle with the focus on its advantages and disadvantages. The possibility of using a single automated system to manage the stages of the life cycle is explored.
Keywords: *lifecycle, automated system, electrical engineering product.*

Введение

В настоящее время наблюдается тенденция значительного сокращения жизненного цикла продукта за счет ускорения научно-технического прогресса, что подразумевает под собой сокращение времени или затрат на непроизводительные этапы. Поэтому актуальной является задача автоматизированного управления всеми стадиями жизненного цикла (ЖЦ) высокотехнологического продукта в едином информационном пространстве. Продукт электротехники можно считать высокотехнологичным, так как под этим понимается изделие промышленности, при производстве которого задействованы высокие технологии.

Рассмотрим ЖЦ изделия по стандарту Р50.1.031-2001. ЖЦ – это совокупность этапов, через которые проходит изделие за время своего существования. Этапы представлены на рис. 1. Такая своеобразная жизнь электрооборудования объекта обычно начинается с того, что представитель заказчика исследует рынок электротехники по трем важным показателям: цена, качества, возможность планировать электромонтажные работы на объекте в зависимости от готовности объекта и с учетом сроков поступления заказанной продукции поставщиков. При этом жизненный цикл объекта представляет собой системообразующий процесс, важнейший для представления современному инженеру или руководителю предприятия, где планируется эксплуатировать данный объект.

Современные технологии предлагают развитие автоматизированной системы для управления всеми этапами ЖЦ.

Автоматизированная информационная система (АИС) – это набор программных средств, предназначенных для хранения и управления данными и информацией, а также для вычислений, за все процессы в такой системе отвечает человек-оператор. Выделяют четыре типа АИС:

- охватывает один процесс в одной организации;

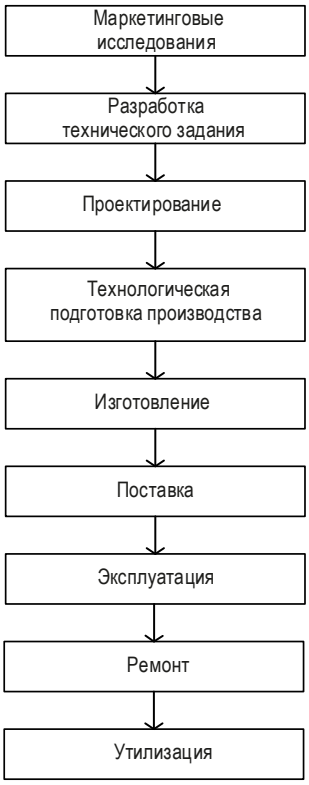


Рис. 1. Этапы жизненного цикла продукта

➢ объединяет несколько процессов в одной организации;

➢ обеспечивает функционирование одного процесса в масштабе нескольких взаимодействующих организаций;

➢ реализует работу нескольких процессов в масштабе нескольких организаций.

Рассмотрим две основные модели реализации ЖЦ продукта электротехники.

• Каскадная модель

Предполагает последовательное выполнение различных видов деятельности. Таким образом, каждый вид деятельности выполняется на какой-то одной фазе жизненного цикла. Классическая каскадная модель предполагает только движение вперед по этой схеме: все необходимое для проведения очередной деятельности должно быть подготовлено в ходе предшествующих работ (см. рис. 1).

Переход от одного этапа жизненного цикла к другому осуществляется, когда завершен предыдущий, и каждый этап имеет свои данные для входа и выхода. Внесение дополнений на этапах возможно, но в таком случае будет меняться вся модель с первого этапа. Каждый этап зависит от результатов предыдущего и влияет на результаты последующего. Очевидным недостатком такой модели является то, что оценить качество готовой продукции можно только на последнем этапе жизненного цикла.

Стоит отметить, что эта самая распространенная модель, которая используется в настоящем времени.

• Итеративная модель

Предполагает разбиение жизненного цикла проекта на последовательность итераций, каждая из которых является отдельным минипроектом, включающим все фазы жизненного цикла, по сравнению с проектом в целом. Цель каждой итерации – получение работающей версии системы, включающей функциональность, которая определена интегрированным содержанием всех предыдущих и текущей итерации. Результат финальной итерации содержит всю требуемую функциональность продукта [1].

Наступление следующего этапа жизненного цикла не связано с завершением предыдущего, что является, несомненно, преимуществом, так как позволяет изготовить продукт высокого качества.

Данная модель не пользуется широким спросом среди производителей.

Умение управлять ЖЦ продукта, способность осуществлять его разработку в кратчайшие сроки становятся важными конкурентными преимуществами. Получить их становится возможным благодаря внедрению информационных технологий.

Мировые тренды в области управления полным жизненным циклом содержат такие позиции, как глобальная кооперация, технологическая сложность изделий и низкие затраты на создание изделий.

В широком смысле этапы ЖЦ можно представить в виде последовательного выполнения следующих операций (рис. 2).

В основе всех этих этапов лежат регламентирующие документы, ГОСТ. Реализация этих этапов осуществляется в разных программных продуктах, объединение которых возможно в единой информационной среде [2].

В настоящее время уже достаточно автоматизированных средств и систем управления ЖЦ объекта. Главная задача – организовать функционирование этих систем в едином цифровом информационном пространстве, сделать это пространство доступным и безопасным для участников жизни продукта.

Достоинством такой системы будет постоянный мониторинг состояния продукта, оперативное реагирование в случае выявления неисправностей, а также возможность повысить производительность труда, облегчить труд пользователей, отвечающих за этапы ЖЦ продукта.

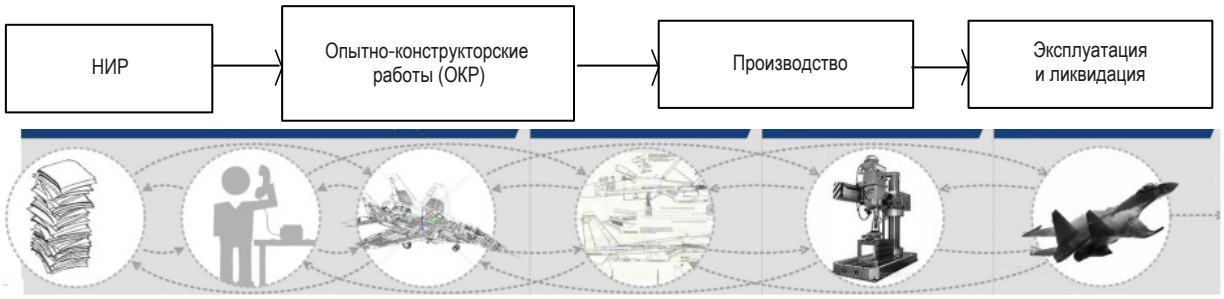


Рис. 2. Этапы жизненного цикла

Не менее важным будет достижение эффект синергии – резонанса производительности. Условия синергии – наличие единого информационного пространства, участники вдохновляют друг друга, цели участников пересекаются. При условии, что все участники ЖЦ объекта будут использовать единую систему для проектирования и документооборота, можно будет утверждать, что это приведет к весьма существенному повышению производительности труда, по сравнению с разработками на отдельных компьютерах.

Выводы

Предлагаемые (разрабатываемые) решения цифровой трансформации основных взаимосвязанных процессов жизненного цикла высокотехнологичного продукта позволяют значительно (в несколько десятков раз) сократить время непроизводительных этапов за счет единого цифрового информационного пространства участников жизненного цикла, взаимодействующих удаленно в составе различных корпоративных информационных систем и даже иногда в различных часовых поясах.

Ожидаемые наиболее эффективные пути повышения производительности и результативности взаимодействия информационных систем участников достигаются на основе разработанной стратегии цифровой трансформации с учетом возникающих при этом эффектов синергии: резонанса производительности коллективной работы и «оркестрового эффекта», создаваемого общим ритмом единой интегрированной сети управления всеми или большинством этапов.

Библиографический список

1. *Берг Д. Б., Ульянова Е. А., Добряк П. В.* Модели жизненного цикла: учеб. пособие. Екатеринбург, 2014. 74 с.

2. *Мялковский И. К., Треяль В. А.* Проблемы цифровизации в жизненном цикле объекта электротехники // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы III Международ. научно-практической конф. СПб., 2020. С. 124–133.

УДК 629.039.58

О. Б. Чернышева*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ РАДИАЦИОННОГО РИСКА ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

Рассмотрены вопросы, связанные с оценкой потенциального риска для населения и окружающей среды при эксплуатации АЭС. Особое внимание уделено радиационному риску населения при выбросе радиоактивных веществ за пределы защитной оболочки станции. Дана оценка радиационной опасности для населения при переходе к закрытому ядерному топливному циклу.
Ключевые слова: *атомная электростанция, безопасность, дерево событий, радиационный риск, замкнутый ядерный топливный цикл.*

O. B. Chernysheva*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

NALYSIS OF THE RADIATION RISK FOR THE POPULATION DURING THE OPERATION OF THERMAL NEUTRON REACTORS

To conclude hereunder the issues were considered related to the assessment of the potential risk to the public and the environment during the operation of nuclear power plants. The special attention was paid to the radiation risk of the population during the release of radioactive substances outside the protective shell of a nuclear power plant and the assessment's risk was carried out using the mathematical model based on the construction of the event tree. The issues of the radiation danger for the population were considered during the transition to the closed nuclear fuel cycle.
Keywords: *nuclear power plant, safety, event three, radiation risk, closed nuclear fuel cycle.*

Атомная энергетика является одним из ключевых игроков на энергетическом рынке РФ, в общем энергобалансе на нее приходится 20,3 % от общего объема генерации с объемом выработки в 2020 году электроэнергии 215,745 млрд кВт·ч [1].

На территории РФ эксплуатируются 38 энергоблоков с различными типами реакторных установок (РУ) установленной мощностью 30,6 ГВт. По сравнению с другими источниками генерации электрической энергии (например, ТЭС или ГЭС), атомные электростанции (АЭС) обладают рядом характерных особенностей.

Во-первых, источником энергии является ядерное топливо – потенциальный источник радиоактивных веществ. В нормальном режиме эксплуатации в РУ протекает самоподдерживающаяся цепная реакция с реактивностью $\rho=0$, в результате которой на стенках и трубопроводах технологического оборудования 1-го контура происходит оседание продуктов деления топлива (радионуклидов). Возникновение аварийной ситуации может привести к выходу этих веществ за предельно допустимые границы и, как следствие, радиоактивному облучению персонала, населения и окружающей среды. Для исключения возможности создания подобных ситуаций к системам безопасности (СБ) АЭС предъявляются высокие требования, согласно которым воздействие радиационных продуктов АЭС на население и окружающую среду – не более 1 % дозы, получаемой от источников естественной радиации [2].

Во-вторых, для предотвращения перехода РУ в подкритичное и надкритичное состояния и, соответственно, недопущению выброса радиоактивных веществ за пределы станции применяются различные системы управления и защиты (СУЗ).

Потеря внешнего и аварийного электроснабжения АЭС является основной потенциальной причиной разрушения энергоблока с последующим радиационным воздействием. Примером может служить авария на АЭС «Фукусима-Дайичи» (Япония, 2011 г.). В результате землетрясения было прервано внешнее электропитание, цунами привело к затоплению станции, выходу из строя аварийной системы электропитания и прекращению охлаждения активной зоны реакторов, приведшее к взрывам на энергоблоках с выбросом радиоактивных веществ в атмосферу.

Причины и последствия этой аварии достаточно подробно изучены специалистами и при-

няты соответствующие меры для предотвращения возникновения подобных ситуаций. Так, в РУ на тепловых нейтронах поколения III+ (например, ВВЭР-1200/ТОИ) для повышения надежности предусмотрены дополнительные системы защиты: «ловушка» – устройство для локализации расплава активной зоны, пассивные каталитические рекомбинаторы водорода, система пассивного отвода тепла от двойной защитной оболочки (контаймента), то есть выполнение достаточно жестких требований безопасной эксплуатации АЭС достигается за счет усложнения систем защиты и, соответственно, увеличения капитальных вложений в АЭС.

Важную роль при оценке безопасности АЭС играет вероятностный анализ (ВА), на основании которого разрабатываются математические модели возможных развитий аварийных ситуаций и проводится расчет и оценка вероятностных показателей надежности блоков АЭС. Также ВА позволяет сделать оценку состава и количество выбрасываемых в окружающую среду радиоактивных веществ, определить величину дозы облучения, то есть выполнить оценку радиационного риска от АЭС (рис. 1).

Понятие «риск» регламентировано Федеральным законом № 184-ФЗ и применительно к АЭС может быть определено как «вероятности и последствия наступления неблагоприятного события» [3]. Риск обусловлен случайными событиями внутреннего и внешнего воздействия, например, техногенными и экологическими катастрофами, аварийными ситуациями на АЭС и экологическими рисками.

Радиационный риск, как правило, обусловлен нейтронным и гамма-излучением, а также излучением α- и β-частиц при радиоактивном распаде нуклидов. Оценка радиационного риска является одной из основных оценок, проводимых с помощью ВА. Наиболее уязвимым, с точки зрения радиационной опасности, является населения, поскольку оно не обладает полным объемом информации о масштабах аварийной ситуации.

При проведении ВА широкое практическое применение получил метод, основанный на построении деревьев событий/отказов (ДС/ДО) в виду их простоты и наглядности возможного развития исходного события. Для определения частоты появления события, вызванного отказом той или иной системы безопасности, строится модель в виде графа, где отображаются события, которые могут возникнуть при наступлении исходного события. Построенный граф позволяет рассчитать вероятности наступления этих событий и проанализировать потенциальные последствия.

На рис. 2 представлено ДС развития аварийной ситуации при исходном событии А, соответствующего нарушению целостности трубопровода (разрыву). События, имеющие место при наступлении события А, можно охарактеризовать как:

Б – сбой в системе электроснабжения;

В – сбой в работе системы аварийного охлаждения активной зоны реактора;

Г – нарушение работы системы по выводу продуктов деления из 1 контура;

Д – разрушение защитной оболочки (контаймента).

На рис. 2 приняты следующие обозначения:

Q_i – вероятность отказа i-й системы;

$Q_{i/j}$ – условная вероятность отказа i-й системы при условии отказа j-й системы.

Частота возникновения исходного события А определяется по результатам анализа эксплуата-

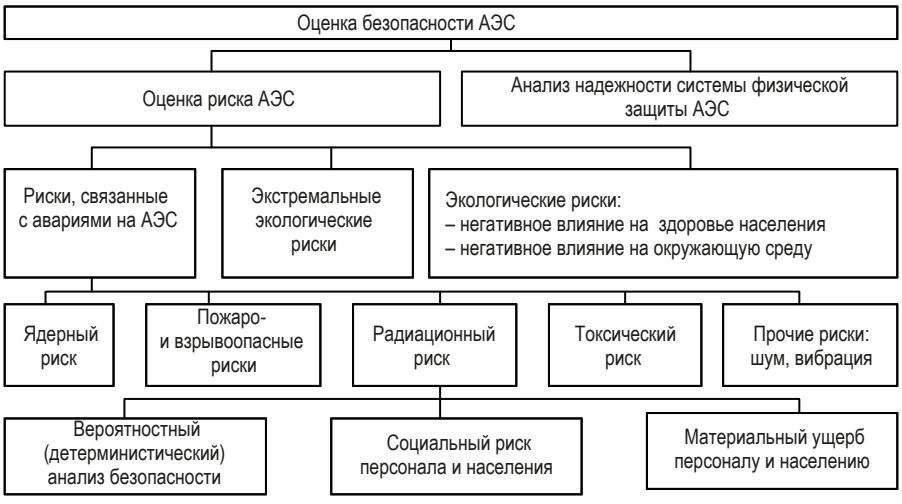


Рис. 1. Оценка безопасности АЭС

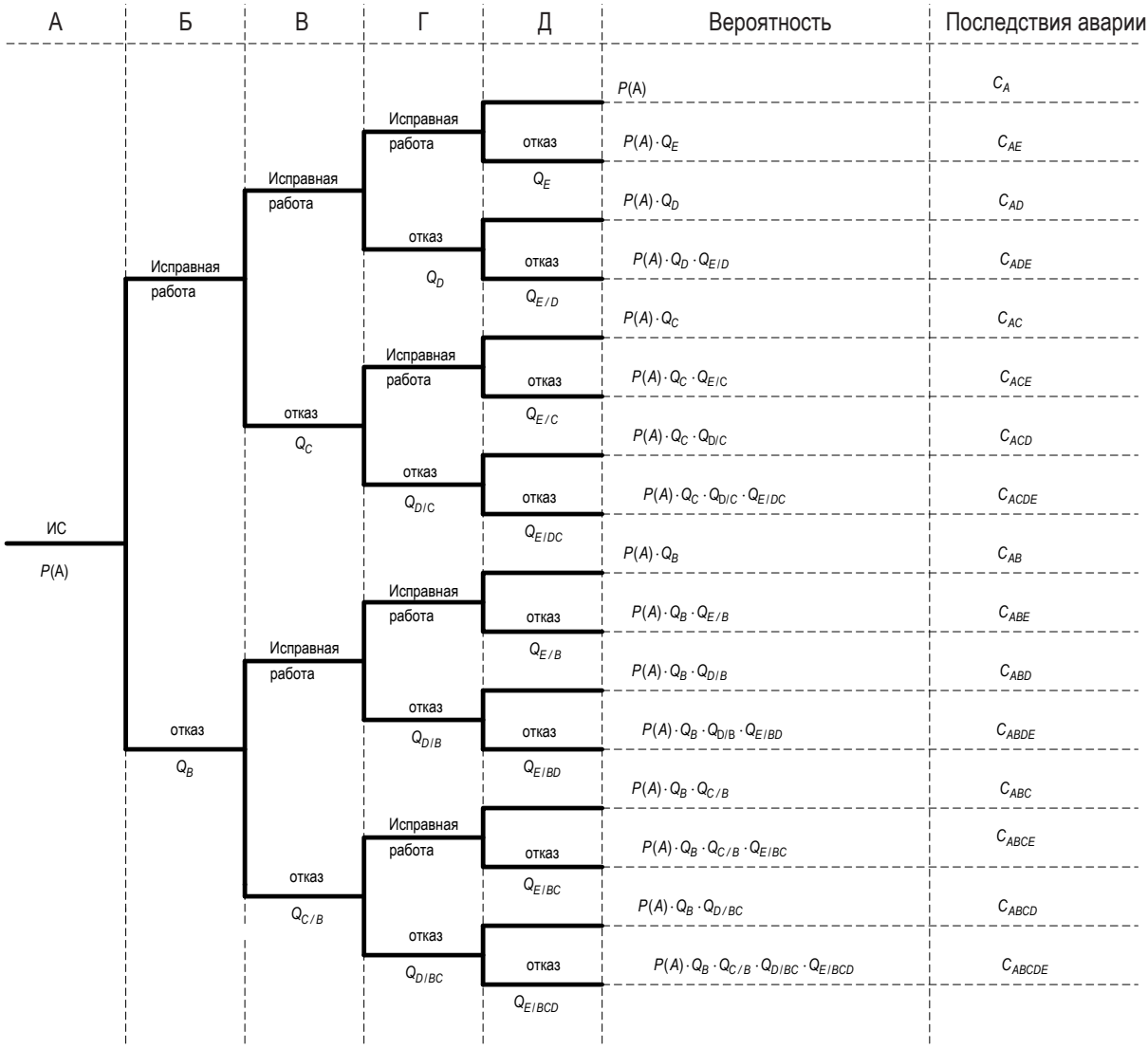


Рис. 2. Схема дерева событий

ции энергоблока и составляет не более $7{\cdot}10^{-8}$ 1/ректор-год. Дерево событий позволяет рассчитать вероятности наступления неблагоприятных событий и сделать оценку их последствий. В табл. 1 представлены частоты возникновения исходных событий для наиболее важных систем АЭС.

Количественная оценка риска производится по оценке вероятности возникновения опасных ситуаций P и уровню воздействия радиоактивных выбросов E на население и окружающую среду. Тогда величина риска может быть определена как:

$$R = \sum_{i=1}^{n} k \cdot P_i \cdot E_i < R_{\text{доп}},$$

где $R_{\text{доп}}$ – допустимый уровень риска, 1/год; E_i – суммарная эффективная доза облучения населения и персонала, мЗв; P_i – вероятность возникновения аварийной ситуации; k – коэффициент, определяющий связь между частотой смертельных исходов от воздействия опасных факторов (k=5,6·10^{-2} 1/Зв) [4].

Суммарная эффективная доза облучения населения в течение рассматриваемого временного интервала определяется по формуле:

$$E_i = E_{i,a}^{ext} - + E_{t,s}^{ext} - + E_i^{inh} - + E_i^{ing} -, \text{ мЗв},$$

$$E_i = E_{i,a}^{ext} + E_{t,s}^{ext} + E_i^{inh} + E_i^{ing}, \text{ мЗв},$$

где $E_{i,a}^{ext}$ – суммарная доза внешнего облучения от радиоактивного облака; $E_{t,s}^{ext}$ – суммарная доза внешнего облучения от радиоактивных осадков; E_i^{inh} – суммарная доза внутреннего облучения, обусловленная ингаляцией радиоактивных веществ; E_i^{ing} – суммарная доза облучения, обусловленная попаданием в организм человека с продуктами питания [5].

Таблица 1

Частота наступления групп исходных событий

Исходное событие	Частота исходного события, 1/год	Частота повреждения активной зоны, 1/год
Обесточивание энергоблока	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Разрыв питательного трубопровода	$6{,}1 \cdot 10^{-6}$	$5{,}03 \cdot 10^{-8}$
Потеря циркуляционной воды	$2{,}1 \cdot 10^{-4}$	$1{,}99 \cdot 10^{-7}$
Повреждение корпуса реактора	$1{,}0 \cdot 10^{-7}$	$1{,}0 \cdot 10^{-7}$
Потеря технической воды	$1{,}3 \cdot 10^{-6}$	$3{,}34 \cdot 10^{-11}$

Коэффициенты, характеризующие степень радиационного риска для различных способов облучения, представлены в табл. 2.

Анализ данных, представленных в табл. 2, показывает, что наибольшую опасность представляют ^{90}Sr, ^{137}Cs и ^{239}Pu, поскольку они имеют большие периоды полураспада и, соответственно, достаточно долгое время оказывают негативное влияние на население и окружающую среду. Усовершенствование СБ энергоблоков на тепловых нейтронах снижает вероятность повреждения защитной оболочки и, следовательно, снижает вероятность радиационного воздействия на население и окружающую среду.

Конструктивные особенности АЭС, функционирующих в настоящее время в РФ, соответствуют открытому ядерному топливному циклу, который подразумевает добычу урана с последующим обогащением и организацию мест хранения отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Перспективное направление развития ядерной энергетики определено [6], согласно которой предусматривается переход к двухкомпонентной ядерной энергетической системе. Такая система предполагает совместную эксплуатацию энергоблоков с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах (БН). При этом из ОЯТ реакторов ВВЭР планируется выделять плутоний для изготовления МОКС-топлива, необходимого для реакторов на БН. Таким образом, организуется замкнутый ядерный топливный цикл, имеющий следующие преимущества:

– минимизация хранилищ для ОЯТ позволит значительно снизить уровень радиационного риска не только для персонала, но и для населения и окружающей среды;

– сокращение санитарно-защитной зоны и ограничение зоны наблюдения границами АЭС, что существенно снижает вероятность выхода радиоактивных веществ за пределы станции;

– реализация замкнутого цикла способствует разработке инновационных технологий для РУ типа ВВЭР, в частности, создание ВВЭР со спектральным регулированием, позволяющим контролировать распределение энергии в активной зоне реактора за счет регулирования с пектра нейтронов [7].

Таким образом, при дальнейшем увеличении генерирующих мощностей АЭС ключевой проблемой останется обеспечение приемлемого уровня безопасности и минимизация воздействия вредных веществ на окружающую среду ЯЭ в целом.

Таблица 2

Коэффициенты радиационного риска при различных видах облучения

Радионуклид	Период полураспада	Потребление воды и пищи, 1/Бк	Вдыхание, 1/Бк	Внешнее облучение от почвы в течение года, Бк/г
^{3}H	12,3 лет	$2{,}4 \cdot 10^{-12}$	$1{,}4 \cdot 10^{-11}$	0
^{60}Co	5,27 лет	$1{,}4 \cdot 10^{-9}$	$6{,}0 \cdot 10^{-10}$	$3{,}3 \cdot 10^{-4}$
^{90}Sr	29,1 лет	$3{,}8 \cdot 10^{-9}$	$2{,}5 \cdot 10^{-9}$	$5{,}3 \cdot 10^{-7}$
^{131}I	8,04 сут	$8{,}9 \cdot 10^{-9}$	$3{,}6 \cdot 10^{-9}$	$4{,}3 \cdot 10^{-5}$
^{137}Cs	30 лет	$6{,}5 \cdot 10^{-10}$	$2{,}3 \cdot 10^{-10}$	$6{,}9 \cdot 10^{-5}$
^{239}Pu	24 100 лет	$2{,}1 \cdot 10^{-8}$	$2{,}5 \cdot 10^{-6}$	$5{,}4 \cdot 10^{-9}$

Библиографический список

1. Основные производственные результаты 2020 г. URL: https://www.rosenergoatom.ru/reports_folder/reports2020/ (дата обращения: 18.01.2022).

2. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Нормы безопасности МАГАТЭ. IAEA, Вена, 2015. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1578_R_web.pdf (дата обращения: 19.01.2022).

3. О техническом регулировании. Федеральный закон № 184-ФЗ от 27.12.2002. М., 2002. 84 с.

4. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) / Пер. с англ.; под общей ред. М. Ф. Киселева, Н. К. Шандалы. М., 2009.

5. Оперативная оценка доз облучения населения при радиоактивном загрязнении территории воздушным путем: Методические указания МУ 2.6.1.2153-06. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2007.

6. Национальный проект: «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в РФ на период до 2024 года» (с продлением до 2030 г.). URL: http://www.innov-rosatom.ru/ (дата обращения: 25.01.2022).

7. *Чернышева О. Б.* Основы обеспечения безопасности атомных станций: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2021. 97 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Аман Елена Эдуардовна
Кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики и механики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – МЭМС, элементы систем управления.
Anhelena7@gmail.com

Антонов Геннадий Геннадьевич
Старший научный сотрудник, кандидат технических наук.
ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Область научных интересов – физика плазмы.
gennanantonov@yandex.ru

Афлятунов Радмир Рифович
Ассистент кафедры электротехники и электрооборудования предприятий.
Уфимский государственный нефтяной технический университет.
Область научных интересов – повышение энергетической эффективности и надежности, снижение массы и габаритов электротехнических систем и устройств методами функциональной интеграции электромагнитных элементов.
radmir.afl@yandex.ru

Бадретдинова Гузель Ильсиновна
Студентка кафедры технологий защиты информации.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информатика и вычислительная техника, информационная безопасность, безопасность информационных систем.
badretguzel@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

Белай Василий Евгеньевич
Аспирант, ассистент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – робототехника, iot, искусственный интеллект.
belvasevg@yandex.ru

Березкин Даниил Александрович
Студент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность.
Dankrou@mail.ru

Беспятый Григорий Юрьевич
Студент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – робототехника, iot, искусственный интеллект.
grisha.bespyatyy@gmail.com

Бобрышов Алексей Павлович
Ассистент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроснабжение, энергетические системы.
ap.bobryshov@mail.ru

Богачева Надежда Анатольевна
Ведущий программист кафедры безопасности информационных систем.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – динамика движения колесных транспортных средств, теория автоматического управления.
bona2309@gmail.com

Братцев Александр Николаевич
Кандидат технических наук, заведующий лабораторией.
ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Область научных интересов – электрические разряды в плотных средах и потоках, генераторы плазмы, плазменные технологии.
bratan55@yandex.ru

Буйчик Диана Димовна
Магистрант.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – накопители энергии.
buychikdd@mail.ru

Буласова Валерия Геннадьевна
Студент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – робототехника, iot, искусственный интеллект.
valeriyabulasowa17@gmail.com

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

Васильев Петр Игоревич
Ассистент кафедры электротехники и электрооборудования предприятий.
Уфимский государственный нефтяной технический университет.
Область научных интересов – повышение энергетической эффективности и надежности, снижение массы и габаритов электротехнических систем и устройств методами функциональной интеграции электромагнитных элементов.
Petrvasilyev17@mail.ru

Воропаев Илья Андреевич
Ассистент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационная безопасность, безопасность информационных систем, архитектура информационных систем, распределенные информационные системы, децентрализованные информационные системы.
ilyavoropaev64@yandex.ru

Ганьшин Юрий Анатольевич
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

Гатаев Денис Станиславович
Студент кафедры безопасности информационных систем.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информатика и вычислительная техника, информационная безопасность, безопасность информационных систем, кибератаки, киберразведка.
denis.gataev@yandex.ru

Гильманов Эдуард Ахнафович
Главный энергетик.
Государственное унитарное предприятие «Уфаводоканал».
Область научных интересов – высоковольтный электропривод, частотно-регулируемый электропривод, возобновляемые источники электроэнергии.
gilmanov@uwc.ufanet.ru

Гончарова Виктория Игоревна
Ассистент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – нелинейные системы автоматического управления.
goncharova_31kaf@bk.ru

Данилов Александр Дмитриевич
Доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования.
Воронежский государственный технический университет.
Область научных интересов – автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.
danilov-ad@yandex.ru

Елина Татьяна Николаевна
Доцент кафедры технологий защиты информации.
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

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

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

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

Жилин Илья Андреевич
Студент кафедры технологий защиты информации.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информатика и вычислительная техника, информационная безопасность, безопасность информационных систем.
ilyazhilinne@gmail.com

Жуков Алексей Дмитриевич
Кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – динамика движения колесных транспортных средств, теория автоматического управления.
nibium.zhukov@yandex.ru

Иванов Никита Дмитриевич
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – энергоэффективность электроэнергетических систем.
animono746@gmail.com

Исаков Константин Сергеевич
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – физические методы контроля качества и диагностики.
isakov-k-s99@mail.ru

Комарова Екатерина Андреевна
Ассистент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроснабжение, надежность электрических систем.
katerina_kata@mail.ru

Косинский Тимофей Вячеславович
Студент кафедры уголовного права и таможенных расследований.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информатика и вычислительная техника, информационная безопасность, безопасность информационных систем, кибератаки, киберразведка, OSINT.
harizma.96@mail.ru

Кузенов Виктор Витальевич
Доктор физико-математический наук, доцент, профессор ФГБОУ ВО 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

Кузьменко Владимир Павлович
Старший преподаватель кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроснабжение, энергетические системы.
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

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

Куст Александра Павловна
Магистрант кафедры информационно-управляющих систем.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – динамика движения колесных транспортных средств, теория автоматического управления.
Kust997@mail.ru

Лебедев Денис Константинович
Магистрант 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.
gdandee822@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

Ляхнов Макар Валерьевич
Студент кафедры защиты информации.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – кибератаки, кибербразведка, криптографическая защита информации.
unusualman2020@gmail.com

Мыльников Владимир Аркадьевич
Доцент кафедры технологий защиты информации.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Область научных интересов – информационная безопасность, облачные технологии, распределенные системы, математическое моделирование.
va.mylnikov@yandex.ru

Недомолкин Максим Павлович
Студент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – кибератаки, кибербразведка, криптографическая защита информации, ИБ АСУ, системное администрирование.
clay.00@inbox.ru

Ольховский Антон Владимирович
Заместитель главного инженера ООО «Неваэнергоатом».
Область научных интересов – автономные системы электроснабжения.
antonolhovskii@mail.ru

Перетятько Никита Сергеевич
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электрические машины, электроэнергетика.
Nikitos.56rus@mail.ru

Подпорина Арина Эдуардовна
Студентка кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электрические машины и аппараты, электропривод, цифровые двойники.
arina23051999@gmail.com

Попов Виктор Евгеньевич
Кандидат технических наук, заместитель директора.
ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Область научных интересов – электрические разряды в плотных средах и потоках, генераторы плазмы, плазменные технологии.
derwinter@mail.ru

Преловская Ольга Геннадьевна
Аспирант.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ.
Область научных интересов – всеобщее управление качеством, бережливое производство, решение проблем.
Ola.prelovskaya@gmail.com

Приходский Андрей Александрович
Магистрант 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.
prihodskiy@gmail.com

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

Романюга Роман Романович
Студент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электрические машины.
Lzas38@mail.ru

Рыжков Сергей Витальевич
Доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры теплофизики (Э6) ФГБОУ ВО МГТУ им. Н. Э. Баумана (НИУ).
Область научных интересов – альтернативные системы, магнитно-инерциальный термоядерный синтез, математическое моделирование, ядерная энергетика, физика плазмы.
svryzhkov@bmstu.ru

Саксонов Иван Олегович
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – энергоэффективность электроэнергетических систем.
ivansaxonov666@gmail.com

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

Сверлов Михаил Данилович
Студент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информатика и вычислительная техника, информационная безопасность, безопасность информационных систем.
FEDOFice@yandex.ru

Сержантова Майя Вячеславовна
Кандидат технических наук, доцент.
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

Скорина Сергей Феодосиевич
Кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – инерциальные сенсоры параметров движения, системы управления подвижными объектами.
ssf@aanet.ru

Соболева Людмила Валерьевна
Ассистент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы управления.
Sobol-lyudmila@mail.ru

Солёная Оксана Ярославовна
Кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – энергосбережение и повышение энергетической эффективности, развитие методов оценки безопасности технологических объектов.
osolenaya@guap.ru

Солёный Сергей Валентинович
Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электроэнергетика, электромеханика, автоматизация, робототехника, информационная безопасность, технологическое предпринимательство, искусственный интеллект.
ssv@guap.ru

Стекленев Антон Юрьевич
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – методы снижения кондуктивных помех в сети.
steklenevanton@yandex.ru

Таболин Иван Иванович
Аспирант кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования.
Воронежский государственный технический университет.
Область научных интересов – автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.
iwan.tabolin@yandex.ru

Фомичева Светлана Григорьевна
Кандидат технических наук, профессор кафедры технологий защиты информации.
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 – повышение энергетической эффективности и надежности, снижение массы и габаритов электротехнических систем и устройств методами функциональной интеграции электромагнитных элементов.
khazievart@mail.ru

Хакимьянов Марат Ильгизович
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования предприятий.
Уфимский нефтяной технический университет.

Область научных интересов – возобновляемые источники электроэнергии, электропривод.
hakimyanovmi@gmail.com

Шушкин Артемий Владимирович
Студент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – кибератаки, кибер разведка, криптографическая защита информации, форензика.
atomatic19@gmail.com

Яковлев Никита Сергеевич
Магистрант кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – энергоэффективность электроэнергетических систем.
nik-yakovlev-1998@mail.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**

Беззатеева В. С. СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА И ЗАЩИТЫ НЕСОВЕРШЕННОЛЕТНЕГО ОТ ВРЕДОНОСНОГО КОНТЕНТА В СЕТИ ИНТЕРНЕТ ... 3

Березкин Д. А., Ганьшин Ю. А. ПРОБЛЕМЫ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ ... 6

Богачева Н. А., Жуков А. Д., Куст А. П. СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ ... 11

Воропаев И. А., Ляхнов М. В., Бадретдинова Г. И. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ НАУЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ БИБЛИОТЕК ... 16

Воропаев И. А., Ляхнов М. В., Гатаев Д. С. ПРИНЦИП РАБОТЫ СИММЕТРИЧНОГО ШИФРОВАНИЯ ... 19

Воропаев И. А., Ляхнов М. В., Жилин И. А. ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «TAILS» ... 21

Воропаев И. А., Ляхнов М. В., Косинский Т. В. НАВЫКИ OSINT В КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ ... 24

Воропаев И. А., Ляхнов М. В., Сверлов М. Д. ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «CSI LINUX» ... 26

Воропаев И. А., Ляхнов М. В., Шушкин А. В. ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «CAINE» ... 30

Данилов А. Д., Синюков Д. С. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЯДЕРНЫМ БЛОКОМ ... 33

Елина Т. Н., Мыльников В. А. ПРИМЕНЕНИЕ СТАНДАРТА COBIT ПРИ ОЦЕНКЕ РИСКОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОМПАНИИ ... 38

Елина Т. Н., Мыльников В. А. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ПРЕДПРИЯТИИ ... 42

Елина Т. Н., Мыльников В. А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ГРАФОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА РИСКОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ ... 47

Скорина С. Ф. АРХИТЕКТУРНО-ИНФОРМАЦИОННАЯ КОНЦЕПЦИЯ КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ МАШИНЫ ДЛЯ ПРОТИВООБЛЕДЕНИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ... 54

Солёный С. В., Воропаев И. А. О ВНЕДРЕНИИ ПРОВЕРЯЕМЫХ УЧЕТНЫХ ДАННЫХ (VC) И ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ИДЕНТИФИКАТОРОВ (DID) В СИСТЕМУ АУТЕНТИФИКАЦИИ ... 58

Фомичева С. Г. КВАНТОВАЯ ОЦЕНКА ФАЗЫ УНИТАРНЫХ ОПЕРАТОРОВ ... 62

Фомичева С. Г. УПРАВЛЯЕМЫЕ КВАНТОВЫЕ СХЕМЫ СВЕРХПЛОТНОГО КОДИРОВАНИЯ ... 67

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ... **75**

Буласова В. Г., Беспятый Г. Ю., Белай В. Е. ОБЗОР АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ... 75

Городецкий А. Е., Курбанов В. Г.,, Тарасова И. Л. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ БПЛА ... 79

Соболева Л. В., Гарматий Н. И., Исаков К. С. СРАВНЕНИЕ ПРОТОКОЛОВ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ... 84

Солёный С. В., Воропаев И. А., Недомолкин М. П. ОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ... 87

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 ... 97

Шишлаков В. Ф., Гончарова В. И. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗВЕНЬЕВ 103

Якимовский Д. О., Криволапчук И. Г., Полякова Т. Г. О МОДЕЛИРОВАНИИ ШИРОТНО-ИСПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СРЕДЕ NI Multisim^{TM} 110

ЭЛЕКТРОПРИВОД, ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ 120

Гильманов Э. А., Яшин А. Н., Хакимьянов М. И. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВЕТРОСОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK 120

Преловская О. Г. РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ КАК ОБЯЗАТЕЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ОБЩЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ 126

Хазиева Р. Т., Васильев П. И., Афлятунов Р. Р. О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИНТЕГРИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОМПОНЕНТА В СОСТАВЕ ГИБРИДНЫХ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ 130

ЭЛЕКТРОФИЗИКА 133

Антонов Г. Г. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДА С НЕРАВНОВЕСНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ 133

Антонов Г. Г., Братцев А. Н., Попов В. Е. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНО-ПРОТОЧНОГО ПЛАЗМОТРОНА 136

Ганьшин Ю. А., Жеребко С. О. ДЕТЕКТОРЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ УСКОРИТЕЛЯ 140

Кузенов В. В., Бросин П. Д., Рыжков С. В. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ И УДАРНЫХ ВОЛН 144

Салова И. А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭКРАН ТЕХНИЧЕСКОГО СРЕДСТВА 147

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА 152

Бобрышов А. П., Кузьменко В. П., Солёный С. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВИДОВ И СХЕМ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ПОВЕРКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ 152

Буйчик Д. Д., Булатов В. В. ПРИМЕНЕНИЕ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ МАЛОМОЩНЫХ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ 156

Голубков В. А., Федоренко А. Г., Ватаева Е. Ю., Шарафудинов Т. Т. ФОРМИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ НА ДОРОЖКАХ КАЧЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО И НАРУЖНОГО КОЛЕЦ ПОДШИПНИКА 161

Ершов Д. Ю., Лукьяненко И. Н., Аман Е. Э. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ МАТРИЧНЫМ МЕТОДОМ 163

Исаков К. С., Булатов В. В. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СТАНОК ДЛЯ НАМОТКИ ПРОВОЛОКИ 167

Исаков К. С., Гарматий Н. И., Соболева Л. В. СИСТЕМА ПРОИЗВОДСТВА МАТЕРИАЛА ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ИЗ ПЕРЕРАБОТАННОГО ПЛАСТИКА 170

Комарова Е. А., Романова М. С., Елтышева И. В. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 173

Мартынов А. А. ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ РЕЗИДЕНТНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ И ДОКОВЫХ СТАНЦИЙ 177

Ольховский А. В., Солёная О. Я., Куликовская А. В. АВТОНОМНОЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ 183

Перетятько Н. С., Сержантова М. В. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ 190

Сержантова М. В., Романюга Р. Р. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ СЕКЦИЙ СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ 194

Солёная О. Я., Саксонов И. О. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ С НАЛИЧИЕМ УСТРОЙСТВ МИКРОГЕНЕРАЦИИ 202

Сержантова М. В., Лебедев Д. К. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДЫ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА MATLAB 207

Сержантова М. В., Приходский А. А. РОБОТИЗИРОВАННЫЕ МЕХАНОТЕРАПЕВТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ ВЕРХНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ 211

Солёная О. Я., Иванов Н. Д., Яковлев Н. С. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САМП 219

Солёная О. Я., Стекленев А. Ю. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ 226

Солёный С. В., Подпорина А. Э. ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА 235

Солёный С. В., Романова М. С. ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ПРОДУКТА ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ 238

Чернышева О. Б. АНАЛИЗ РАДИАЦИОННОГО РИСКА ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ 241

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ 245

Научное издание

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ’22

XVII Международная конференция по электромеханике и робототехнике 12–14 апреля 2022 г.

Сборник докладов

ISBN: 978-5-8088-1705-0

9 785808 817050

Ответственные за выпуск:
доктор технических наук, профессор *В. Ф. Шишлаков;*
М. С. Романова

Редакторская подготовка *Е. В. Тороповой*
Компьютерная верстка *С. Б. Мацапуры*

Подписано к печати 31.03.2022. Дата выхода в свет 11.04.2022.
Формат 60×84 1/8. Усл. печ. л. 29,7. Уч.-изд. л. 34,4. Тираж 150 экз. Заказ № 129.

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67, лит. А
Распространяется бесплатно